



Ingeniería Industrial

Departamento de Ingeniería Mecánica

**-PROYECTO FIN DE CARRERA-**  
**PARAMETRIZACIÓN Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE  
MODELO DE ESCALERA MEDIANTE MÉTODO DE  
ELEMENTOS FINITOS**

**Autor:** Carlos López Gómez

**Tutora:** Carolina Álvarez Caldas

**Fecha de defensa:** 3 de Junio de 2014

## Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a todas las personas que me han ayudado a desarrollar esta etapa académica en la Universidad Carlos III de Madrid:

A mi tutora de Proyecto, Carolina, por ser un apoyo no sólo técnico sino también anímico en la realización de este proyecto.

A mi familia y muy en especial a mis padres y mi hermano, por darme la oportunidad y las fuerzas para completar esta etapa y estar siempre cuando los necesité.

A mi novia, Silvia, por ser un apoyo en todos estos años y animarme a cada paso.

A mis compañeros de Universidad, perdonad que no os nombre a todos, por compartir todas las experiencias duras y estresantes y acabar convirtiéndolas en recuerdos que no cambiaría por nada.

Por último, gracias a la Universidad Carlos III de Madrid como institución por darme la oportunidad de formarme en esta titulación.

A todos vosotros, GRACIAS

## Índice

1	Introducción.....	7
2	Motivación.....	8
3	Estructura del documento .....	8
4	Abstract .....	9
5	Objetivo .....	10
6	El Método de Elementos Finitos .....	11
6.1	Introducción.....	11
6.2	Conceptos básicos.....	12
7	Software empleado .....	15
7.1	Pro Engineer.....	15
7.2	ANSYS.....	15
7.2.1	Comandos utilizados .....	16
8	Creación y análisis del modelo.....	22
8.1	Funcionamiento general .....	22
8.2	Tipo de elemento.....	24
8.3	Creación de la geometría .....	25
8.3.1	Creación de rellano .....	25
8.3.2	Creación de vigas inclinadas.....	26
8.3.3	Ensamblaje de zonas comunes.....	27
8.3.4	Creación de tramos .....	28
8.3.5	Creación de pilares.....	29
8.4	Simplificaciones del modelo.....	30
8.4.1	Simplificaciones: Modelo de planos medios .....	30
8.4.2	Simplificaciones: Placas de unión.....	30
8.4.3	Simplificaciones: Unión a las paredes del edificio .....	31
8.4.4	Simplificaciones: Unión a pilar .....	31
8.4.5	Simplificaciones: Aplicación de las cargas .....	33
8.5	Asignación de constantes reales y material .....	34
8.6	Mallado.....	34
8.7	Cálculo y aplicación de cargas.....	35
8.7.1	Zona de aplicación .....	36
8.7.2	Valores a aplicar .....	36

8.7.3	Comparación con resistencia del material .....	41
8.7.4	Aplicación de restricciones.....	43
9	Obtención de resultados y verificación.....	44
9.1	Solución a problema tensional I.....	49
9.2	Solución a problema tensional II.....	50
9.3	Solución a problema tensional III .....	51
9.4	Solución a problema tensional IV.....	65
9.5	Solución a problema tensional V.....	67
9.6	Verificaciones finales .....	68
10	Conclusiones.....	70
11	Aplicación y futuros trabajos .....	71
12	Presupuesto.....	72
13	Bibliografía.....	73
	Anexo I: Perfiles utilizados.....	74

## Índice de figuras

Figura 1: Ejemplo de conjunto del modelo .....	7
Figura 2: Biela real y biela representada mediante MEF .....	11
Figura 3: Misma pieza con distinto tamaño de mallado .....	12
Figura 4: Misma pieza distinto tipo de malla .....	13
Figura 5: Tipo de elemento SHELL 63.....	14
Figura 6: Logo Pro Engineer Wildfire 4.0 .....	15
Figura 7: Logo ANSYS .....	15
Figura 8: Flujograma de archivo general.....	23
Figura 9: Tipo de elemento SHELL 63.....	24
Figura 10: Flujograma de la rutina "RELLANO" .....	25
Figura 11: Mapa de identificación de perfiles.....	26
Figura 12: Viga inclinada.....	26
Figura 13: Líneas antes de comprobación.....	27
Figura 14: Líneas comprobadas .....	27
Figura 15: Flujograma de funciones "TRAMO" y "TRAMO INICIAL" .....	28
Figura 16: Mapa de identificación de perfiles.....	29
Figura 17: Creación de los pilares .....	29
Figura 18: Simplificaciones - Placas de unión.....	30
Figura 19: Simplificaciones - Unión a paredes .....	31
Figura 20: Unión a pilar en diseño .....	32
Figura 21: Simplificaciones - Unión a pilar en modelo .....	32
Figura 22: Tramo con escalones .....	33
Figura 23: Estructura sin cargas y con cargas.....	33

Figura 24: Distintas constantes reales de cada pieza.....	34
Figura 25: Cargas aplicadas en la estructura.....	36
Figura 26: Restricciones del modelo .....	43
Figura 27: Disposición de dimensiones I.....	44
Figura 28: Disposición de dimensiones II.....	45
Figura 29: Disposición de dimensiones III.....	45
Figura 30: Huelgo de pisos.....	46
Figura 31: Situación de los problemas tensionales .....	47
Figura 32: Picos de tensión por encima de normativa .....	48
Figura 33: Extremo de DEM-018 antes de solución a problema tensional I.....	49
Figura 34: Extremo de DEM-018 después de solución a problema tensional I .....	49
Figura 35: Antes y después de solución a problema tensional II .....	50
Figura 36: Estado tensional de Variación 2 .....	52
Figura 37: Antes y después de alternativa propuesta.....	53
Figura 38: Estado tensional de Variación 3 .....	53
Figura 39: Estado tensional de Variación 4.....	54
Figura 40: Estado tensional de Variación 5 .....	55
Figura 41: Estado tensional de Variación 6 .....	56
Figura 42: Estado tensional de Variación 7 .....	57
Figura 43: Estado tensional de Variación 8.....	58
Figura 44: Estado tensional de Variación 9.....	59
Figura 45: Estado tensional de Variación 10.....	60
Figura 46: Estado tensional de Variación 11 (I).....	61
Figura 47: Estado tensional de Variación 11 (II).....	62
Figura 48: Estado tensional de Variación 12 .....	63
Figura 49: Estado tensional de singularidad tensional.....	64
Figura 50: Estado tensional anclaje viga DEM-001 .....	65
Figura 51: Cambio en el modelo de anclaje .....	66
Figura 52: Estado tensional con cambio de anclaje .....	66
Figura 53: Estado tensional de singularidad tensional.....	67
Figura 54: Estado tensional de verificaciones finales I.....	68

## Índice de tablas

Tabla 1: Coeficientes parciales de seguridad para las acciones .....	37
Tabla 2: Peso por unidad de superficie de elementos de pavimentación .....	38
Tabla 3: Valores característicos de las sobrecargas de uso .....	39
Tabla 4: Cálculo de áreas de superficie para aplicación de cargas .....	40
Tabla 5: Valores de las fuerzas a aplicar en cada superficie.....	40
Tabla 6: Características mecánicas de los aceros UNE EN 10025.....	41
Tabla 7: Variables de Variación 2 .....	52
Tabla 8: Variables de Variación 3 .....	53
Tabla 9: Variables de Variación 4 .....	54
Tabla 10: Variables de Variación 5 .....	55
Tabla 11: Variables de Variación 6 .....	56
Tabla 12: Variables de Variación 7 .....	57
Tabla 13: Variables de Variación 8 .....	58
Tabla 14: Variables de Variación 9 .....	59
Tabla 15: Variables de Variación 10 .....	60
Tabla 16: Variables de Variación 11 .....	61
Tabla 17: Variables de Variación 12 .....	63
Tabla 18: Variables de Variación 13 .....	63
Tabla 19: Resultados de ANSYS verificaciones finales.....	68
Tabla 20: Tensiones máximas en estructura .....	69
Tabla 21: Tensiones máximas en estructura (mallado fino).....	69
Tabla 22: Tensiones máximas en estructura (final).....	69
Tabla 23: Variables finales del modelo .....	70
Tabla 24: Costes estimados .....	72

## Índice de ecuaciones

Ecuación 1.....	36
Ecuación 2.....	39
Ecuación 3.....	39
Ecuación 4.....	40
Ecuación 5.....	40
Ecuación 6.....	41
Ecuación 7.....	42
Ecuación 8.....	42

## 1 Introducción

Uno de los problemas que surgen en la instalación de ascensores en edificios antiguos es que el espacio existente para el conjunto de ascensor y escalera ya está ocupado en su mayoría por esta última y no permite dicha instalación. La solución encontrada que da pie a este Proyecto Fin de Carrera es la desarticulación de la escalera original del edificio para la posterior instalación de una distinta con un ancho menor de forma que se cree hueco para la caja del ascensor y sus componentes. Para realizar un proceso de construcción de este tipo de escaleras efectivo y con el menor coste posible se ha optado por realizar un diseño de escalera modular formado por perfiles metálicos cuyas dimensiones se pueden adaptar al espacio exigido de forma que con una serie relativamente pequeña de perfiles se pueda realizar la instalación en cualquier situación que se pueda encontrar.

Este proyecto consistirá en la creación de una aplicación que permita el análisis estructural de esa escalera modular realizada a base de distintos perfiles de viga metálicos unidos al forjado y a la base del edificio en el que se vaya a instalar. De esta manera se permitirá un análisis rápido y eficiente de la viabilidad de la instalación de la estructura en base a las longitudes características del hueco reservado en el edificio para la escalera.

Dicha aplicación se va a realizar de forma paramétrica de forma que se lleve al máximo exponente esas características de rapidez en el análisis y efectividad. Una vez el fabricante define un modelo y éste se crea mediante un entorno CAD, parametrizar ese modelo supone que el único cambio a realizar en el cálculo de esfuerzos que soporta la estructura sean los datos de entrada al programa. Es decir, el mismo código de programación valdrá para cualesquiera que sean las dimensiones de la estructura a analizar.

Una vez realizado el análisis en la aplicación se podrá conocer si la estructura aguanta los esfuerzos exigidos en la normativa y las dimensiones que deberán tener los elementos de la estructura, así como los puntos en los que se alcanzan las tensiones máximas de forma que, en caso de necesitarlo, se pueda dotar al conjunto con refuerzos adicionales.



Figura 1: Ejemplo de conjunto del modelo

## 2 Motivación

La motivación de este proyecto viene determinada expresamente por un proveedor comercial de instalaciones de ascensores interesado en la estandarización del proceso de diseño y análisis de sus estructuras de forma que se puedan modificar las dimensiones de las mismas en cada caso sin tener que realizar un nuevo modelo CAD partiendo de cero en cada caso. Mediante este proyecto se permite que el proveedor únicamente tenga que introducir las variables pertinentes para obtener un análisis estructural para las condiciones introducidas, lo que permite ahorrar en tiempos y obtener resultados más estandarizados al contar todos con exactamente la misma programación.

## 3 Estructura del documento

El documento se va a estructurar de la siguiente manera:

En el capítulo 6 titulado “El Método de Elementos Finitos” se desarrollará la teoría y los aspectos propios de este método básico para la realización de este proyecto. En los capítulos siguientes se expondrán las herramientas de software utilizadas y los comandos básicos que han sido incluidos en la realización del código de programación.

A continuación en el capítulo 9 se analizarán los resultados obtenidos mediante el Método de Elementos Finitos. Además después de analizar los resultados se propondrán algunas alteraciones del diseño original de forma que se subsanen ciertas magnitudes que superan los límites impuestos por la normativa vigente aplicable a este tipo de estructuras.

Una vez propuestas estas alteraciones se elegirá un modelo final y se expondrán las conclusiones halladas a lo largo del proceso de creación de este proyecto. Además como finalización se expondrán futuros trabajos que podrían suponer una continuación de este Proyecto Fin de Carrera



## 4 Abstract

One of the major issues whilst installing an elevator in an old building consists on that the existent space for both elevator and ladder is mainly occupied by the ladder, making impossible the installation process. This End of Degree Project focuses on this problem by replacing the former ladder by a new modulated one, narrower than the older version. As a result some empty spaces are created and used to install the elevator and its components. The constructive materials chosen for this structure are metallic beam profiles in order to create a standardised, effective and minimum cost process. Such process allows to modify the dimensions of the design by adding or cutting profiles depending on the dimensions specified by the building.

The Project focuses on the creation of an application which allows to develop the structural analysis of a modulated ladder built with different metallic beam profiles flush-mounted on each floor of the building to be installed on. This application permits to produce an efficient feasibility study concerning the installation of this structure depending on the dimensions of the building.

This application supports parametric modeling in order to maximize the speed and effectiveness of the analysis. Once the manufacturer provides the design of the ladder and the CAD model is generated, the program will only require the dimensions of its elements to start with the structural analysis. Therefore, the application is valid whatever the dimensions of the structure are.

The main output of this feasibility study is to learn whether or not the structure is able to resist the standard stress value established by both normative and the sizes of the elements of the structure according to the dimensions of the building. Not only this application points out the areas where the maximum stress is to be found, but also allows testing possible reinforcements on these areas in case of need.

## 5 Objetivo

El objetivo del proyecto es la creación del código paramétrico de programación propio del Software de análisis de elementos finitos ANSYS que sea capaz de crear la representación virtual de una escalera modulada dependiente de las variables propias de cada edificio (Espacio para el conjunto escalera-ascensor, altura entre pisos, etc.) con un diseño específico para su posterior análisis estructural y estudio de viabilidad del proceso de instalación.

Posteriormente ese código se implementará en una aplicación diseñada en Visual Basic que agrupa varios modelos de diseño distintos y que permitirá elegir al usuario el modelo a instalar y las variables que se necesiten especificar de forma que el proceso de diseño para cada sea más rápido, eficiente y estandarizado.

## 6 El Método de Elementos Finitos

### 6.1 Introducción

El Método de elementos finitos ha supuesto un gran avance a la hora del modelado y análisis de problemas continuos de diversas áreas de la ingeniería. Estos problemas continuos habitualmente se intentaban resolver a través de las ecuaciones diferenciales que los componen, alcanzando de esta manera una complejidad muy alta en algunos casos. Debido a esta complejidad eran necesarios mayores esfuerzos en tiempos de cálculo, la creación de prototipos y otra serie de prácticas que acarreaban costes y mayores tiempos de ejecución.

Mediante el método de análisis de elementos finitos lo que se intenta es abordar el problema dividiéndolo en un conjunto de elementos finitos que se pueden relacionar entre sí mediante ecuaciones más sencillas que, junto con una potencia de cálculo mayor aportada por los ordenadores, permita darnos una aproximación suficientemente precisa de la solución al problema. De esta forma se puede ahorrar costes en prototipos ya que aunque siguen siendo necesarios puesto que la solución que se da es una aproximación a la real, el número necesario para alcanzar resultados satisfactorios reduce drásticamente ahorrando tiempo y dinero.

El Método de Elementos Finitos se utiliza para resolver incógnitas que básicamente se reducen a los grados de libertad del sistema matemático. Es por ello que se puede aplicar a distintas problemáticas dependiendo del tipo de incógnita que se quiera estudiar, siendo los más comunes los siguientes:

- Estructural: En este caso se trata de conocer los desplazamientos que sufre la estructura. Es el tipo de problema a tratar en este trabajo.
- Eléctrico: Estudia la evolución de los voltajes en un circuito dado.
- Magnético: Estudia la evolución de los campos magnéticos en el modelo.
- Térmico: Estudia los cambios de temperatura que sufre el modelo.
- Fluido: La incógnita en este caso son las presiones que ejerce y sufre un fluido

En cada uno de estos casos lo que se estudia es las relaciones que existen entre cada uno de los puntos en que se divide el modelo continuo, llamados nodos, de manera que al interrelacionarse entre sí den como resultado un comportamiento muy similar al del sólido estudiado.

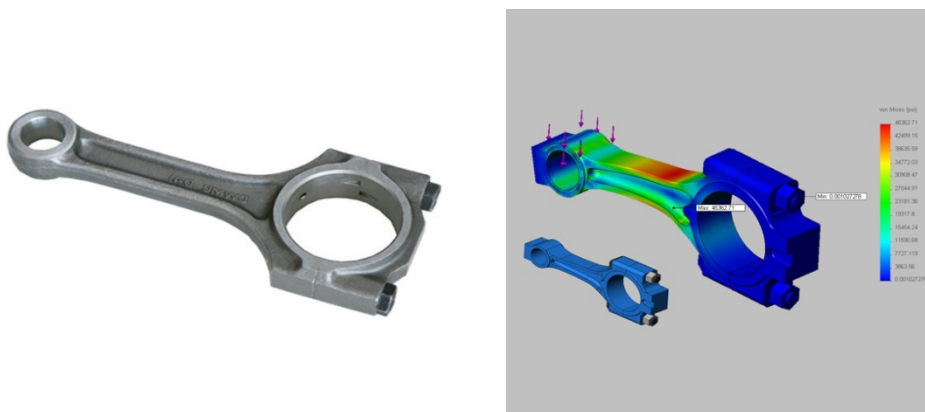


Figura 2: Biela real y biela representada mediante MEF

## 6.2 Conceptos básicos

A la hora de trabajar con este método hay una serie de conceptos que es necesario conocer y comprender para su implantación en un modelo. Son los siguientes:

- a) **Nodos:** Los nodos son los puntos en los que se divide un sólido y que se relacionan entre sí mediante las ecuaciones que dan lugar al modelo.

El mallado es una de las partes más importantes del proceso de cálculo del método de elementos finitos. Consiste en la forma y tamaño en que se dividen los diferentes elementos que se han creado previamente. Consta de distintas variables como son el tamaño de mallado o el tipo de malla. El tamaño de mallado consiste básicamente en lo grandes o pequeños que se quiere que sean las fracciones en que se dividan los elementos; un tamaño de mallado pequeño conllevará un número mayor de divisiones y por tanto un número mayor de puntos en los que se puede estudiar el estado tensional de la pieza. También se debe tener en cuenta que el tamaño de mallado deber ser acorde con las dimensiones de la pieza y no ser excesivamente pequeño para no consumir recursos de computación de forma innecesaria.

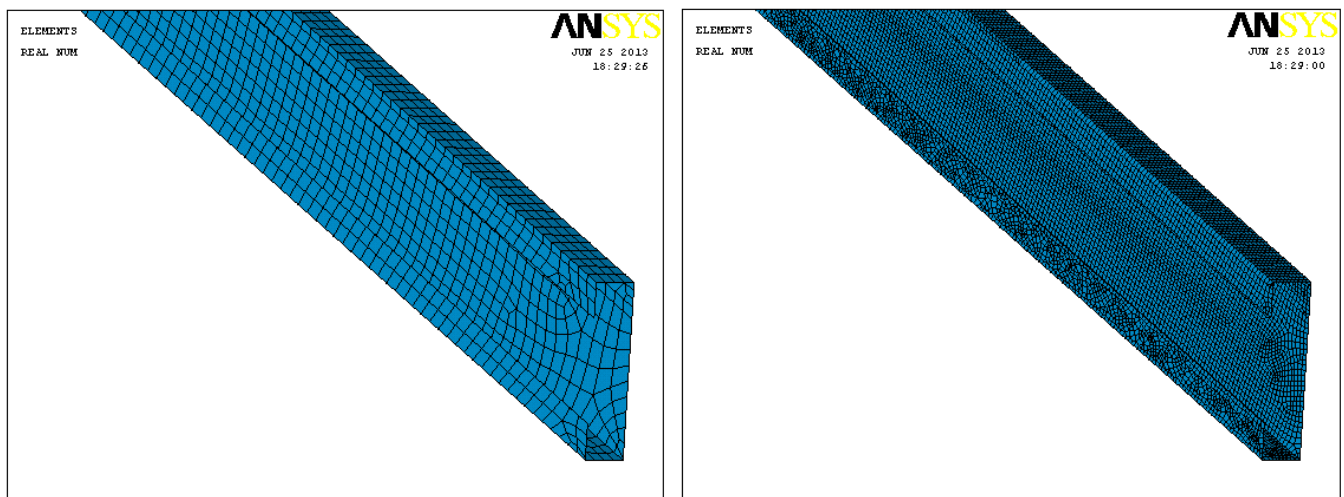


Figura 3: Misma pieza con distinto tamaño de mallado

Además también se puede elegir el tipo de mallado. Esto básicamente consiste en la forma que se quiere que tengan las divisiones del elemento a mallar, es posible elegir entre triángulos, cuadrados, trapecios, etc. La elección del mejor tipo de mallado es singular para cada geometría y por supuesto afecta a los resultados.

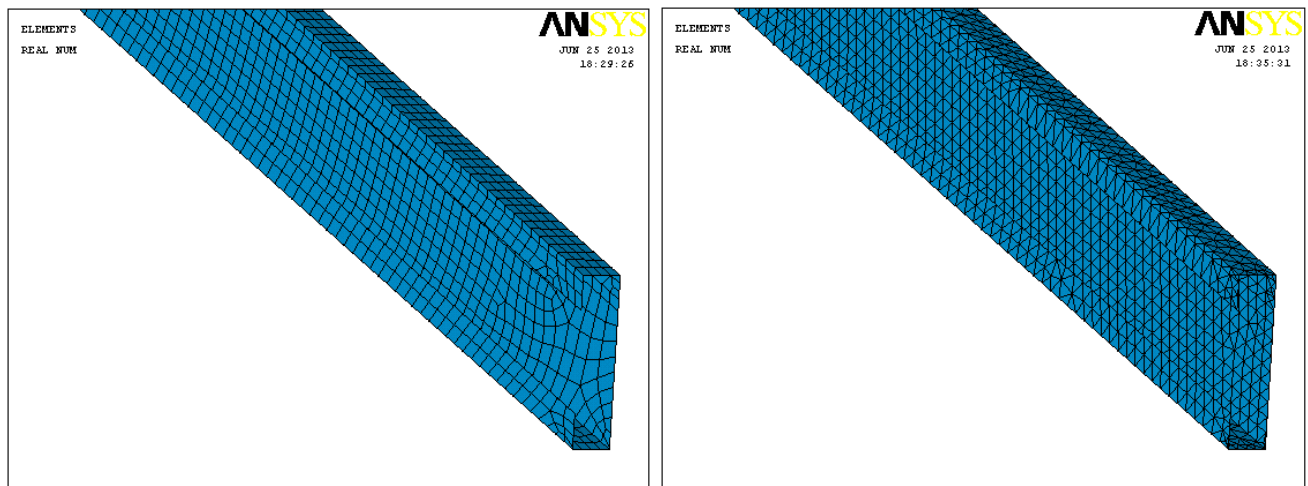


Figura 4: Misma pieza distinto tipo de malla

Dependiendo del mallado utilizado puede haber enormes variaciones en el tiempo de cálculo, ya que un mallado muy pequeño conlleva un número de nodos mucho mayor y por tanto un tiempo de procesamiento mayor a igual potencia de cálculo. Es por ello que es muy importante realizar un correcto mallado. Para ello se debe tener en cuenta que los mallados con tamaño de malla muy fino sólo deben utilizarse para lugares de la estructura donde haya grandes gradientes de tensión en pequeñas longitudes o en sitios que puedan considerarse como concentradores de tensiones, mientras que para el resto de elementos se podrá utilizar un tamaño de malla mayor. De otra manera se estaría utilizando una cantidad de recursos desbordante para una variación mínima en la exactitud de los resultados.

- b) **Elementos:** Son la forma en la que se reparten los nodos, pudiendo formar triángulos, cuadriláteros, etc. Pero además tienen distintas características dependiendo de si son lineales, superficiales o volumétricos.

A la hora de representar modelos mediante el Método de Elementos Finitos (MEF) es muy importante la elección del tipo de elemento que se va a utilizar. Al utilizar este método lo que se está haciendo en realidad es dividir el objeto a analizar en un número finito pero de gran magnitud de elementos de forma que se pueda saber qué está pasando en cada uno de los puntos del objeto.

El tipo de elemento es básicamente la clase de forma y propiedades que van a tener los componentes en que se dividirá la pieza original. La elección de elemento depende de una serie de variables a elegir como por ejemplo si es de una dimensión (normalmente utilizados para líneas), dos dimensiones (normalmente utilizados para áreas) o tres dimensiones (normalmente utilizados para volúmenes), los nodos que lo forman, el tipo de elemento que se quiera calcular, etc.

En este caso se ha optado por un elemento tipo SHELL63 de tipo placa de tres dimensiones, a elegir entre tres y cuatro nodos, con capacidad para que se le apliquen cargas tanto normales como en la dirección del plano, con seis grados de libertad en cada nodo (Tres de traslación y tres de rotación), capacidad para doblarse o actuar como membrana y cuyo único input es el espesor del elemento a modelar.

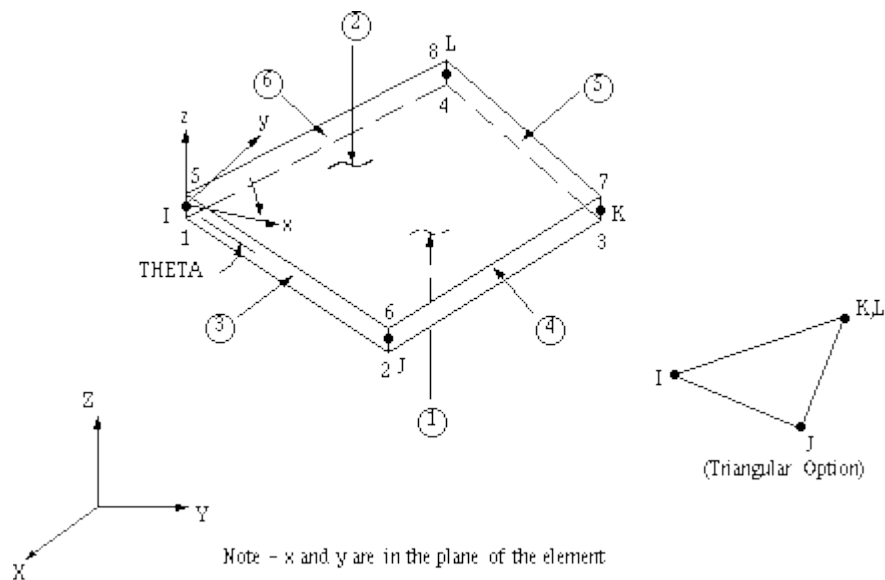


Figura 5: Tipo de elemento SHELL 63

Con este tipo de elemento se está eligiendo un modelo de planos medios, es decir que lo que se representará en ANSYS serán las líneas medias de cada elemento y mediante ellas el programa calculará los resultados.

- c) **Condiciones de contorno:** Se refieren tanto a las cargas que se aplican al modelo como a las restricciones que se le imponen. En este caso las restricciones se dan en forma de empotramientos y otro tipo de sujeciones que tiene la estructura.

## 7 Software empleado

A lo largo de este proyecto se han empleado mayoritariamente dos programas informáticos distintos: Pro Engineer y ANSYS

### 7.1 Pro Engineer

El primero de ellos es el programa de representación gráfica Pro Engineer y básicamente se utilizó para la obtención de las medidas de los diferentes perfiles que constituyen la estructura modular mediante un caso de ejemplo proporcionado por el fabricante.

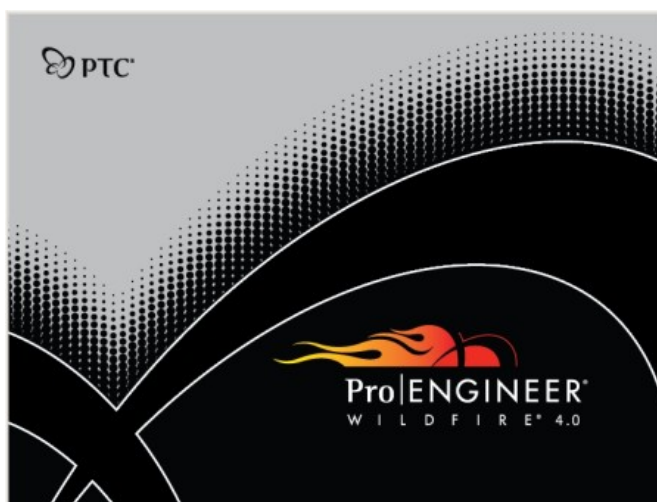


Figura 6: Logo Pro Engineer Wildfire 4.0

### 7.2 ANSYS

El segundo y más utilizado de los dos es el Software de análisis de elementos finitos ANSYS. Mediante la programación de código en su lenguaje APDL (ANSYS Parametric Design Language) se han logrado definir la geometría, procesos de ensamblaje, mallado y análisis estructural de forma paramétrica y estándar para cualesquiera que sean las dimensiones necesarias.



Figura 7: Logo ANSYS

### 7.2.1 Comandos utilizados

A lo largo del proceso de creación de la estructura se han llevado a cabo operaciones propias de la fabricación y el procesado de los perfiles metálicos así como operaciones de posicionamiento y fijación de propiedades del modelo. En este apartado se va a exponer la forma en que se implementan estos procesos en el lenguaje de programación propio de ANSYS.

#### 7.2.1.1 Posicionamiento de los planos de trabajo

Este tipo de herramientas son cruciales para el desarrollo del modelo puesto que permiten el desplazamiento por la estructura de forma que cambie el sistema de coordenadas al más conveniente en cada ocasión. En el desarrollo de este Proyecto Fin de Carrera se han utilizado básicamente los siguientes comandos en el APDL de ANSYS:

- a) Desplazamiento del plano de trabajo por incrementos

WPOFF,X,Y,Z

El comando en sí consiste en el cambio de la posición del plano de trabajo en las dimensiones introducidas para el eje X, el eje Y y el eje Z respectivamente. En el ejemplo se ve como se desplaza el sistema de coordenadas una unidad en el sentido positivo del eje Y.

Ejemplo:

WPOFF,0,1,0

- b) Desplazamiento del plano de trabajo a un punto seleccionado

KWPAVE,KP1

Consiste en el desplazamiento del plano de trabajo a un punto previamente seleccionado (KP1 por ejemplo) y guardado en la memoria (mediante el comando KSEL).



c) Giro del plano de trabajo según sus ejes

WPRO,THXY,THYZ,THZX

Consiste en el giro del sistema de coordenadas según sus propios ejes Z, X e Y respectivamente. Se debe tener en cuenta que siempre se gira el sistema desde la primera coordenada hasta la segunda, por ejemplo tomando una cantidad THXY se gira esa magnitud con dirección desde el eje X hasta el eje Y. En el ejemplo se gira 90 grados el eje X sobre el eje Y

Ejemplo:

WPRO,90,0,0

### 7.2.1.2 Extrusión

Absolutamente todos los perfiles metálicos del modelo se han creado siguiendo el mismo patrón: Creación de los puntos del perfil, unión de sus puntos mediante líneas, selección de esas líneas y posterior extrusión de las mismas a lo largo de un eje definido. No obstante es cierto que el proceso de selección de esas líneas es distinto entre vigas normales y vigas inclinadas. En las primeras se extruye la línea según se ha creado, mientras que en las segundas se crean todas las líneas y después se extruyen. Estas diferencias se deben únicamente a un intento de minimizar las operaciones de corte de superficies.

En cualquiera de los casos el parámetro utilizado es el siguiente:

ADRAG,ALL,LINE

Siendo el primero de los parámetros las líneas seleccionadas que se quieren extruir y el segundo la línea definida como eje del mismo. En el ejemplo se ve como se le asigna el nombre de LEXTRUSION a la última línea creada en el programa, se seleccionan una serie de líneas que forman el contorno de una de las vigas y después se extruyen a lo largo de la antes llamada LEXTRUSION.

Ejemplo:

LEXTRUSION=\_RETURN  
LSEL,S,LINE, ,LEXTRUSION  
\*GET,LEXTRUSION,LINE, ,NUM,MAX, , , ,

LSEL,S,LOC,X,0,ANCHO  
LSEL,R,LOC,Y,0,0  
LSEL,R,LOC,Z,0,ALTO

ADRAG,ALL, , , , , LEXTRUSION,

### 7.2.1.3 Corte

En la mayoría de los casos es necesario realizar cortes en líneas o superficies para definir las uniones entre vigas o para definir las propias vigas (normalmente esto último se da en las inclinadas). Se utilizarán distintos comandos según el caso.

#### a) Corte de líneas

LSBL,ALL,LINES

Consiste en el corte de las líneas seleccionadas mediante otras líneas (LINES) previamente definidas mediante su inclusión en la memoria.

LSBW,ALL

Consiste en el corte de las líneas que estén seleccionadas mediante el plano XY propio del plano de trabajo que se esté utilizando en ese momento.

#### b) Corte de áreas

ASBL,ALL,LINES

Consiste en el corte de las áreas seleccionadas mediante su intersección con las líneas especificadas (LINES).

ASBW,ALL

Consiste en el corte de las áreas seleccionadas por la intersección con el plano XY del sistema de coordenadas utilizado en ese momento.

ADELE,ALL

En ocasiones es necesario eliminar las partes cortadas por estos comandos, acción que se realiza mediante el comando ADELE.

#### 7.2.1.4 Soldadura

La mayoría de las uniones que se tienen en el modelo se dan por soldadura. En este caso no se usa un comando especial para ello sino que se crean dos líneas que sean exactamente iguales para ambas piezas a unir y después se unen en una sola mediante el comando NUMMRG.

#### 7.2.1.5 Definición de análisis, materiales utilizados y constantes reales

##### a) Definición de análisis

Como ya se ha explicado anteriormente, ANSYS es un programa muy complejo que permite utilizar el Método de Elementos Finitos para el estudio de otras magnitudes aparte de las estructurales. Por esta razón es necesario definir en el programa el tipo de análisis a desarrollar. Todo ello se realiza mediante este conjunto de código:

```
/NOPR  
/PMETH,OFF,0  
KEYW,PR_SET,1  
KEYW,PR_STRUC,1  
KEYW,PR_THERM,0  
KEYW,PR_FLUID,0  
KEYW,PR_ELMAG,0  
KEYW,MAGNOD,0  
KEYW,MAGEDG,0  
KEYW,MAGHFE,0  
KEYW,MAGELC,0  
KEYW,PR_MULTI,0  
KEYW,PR_CFD,0  
/GO
```

Como se puede observar todos los tipos de análisis tienen el valor cero, a excepción del estructural puesto que ese es el que se va a realizar.

## b) Definición de materiales

También es necesario definir el tipo de material de que está formada cada pieza. Para ellos primero se definen las propiedades intrínsecas del material como pueden ser el módulo de elasticidad, el coeficiente de Poisson o su densidad mediante el comando MPDATA.

Ejemplo:

```
MPDATA,EX,1,,210E9  
MPDATA,PRXY,1,,0.3  
MPDATA,DENS,1,,7850
```

## c) Definición de constantes reales

Las constantes reales son aquellas que van ligadas al tipo de elemento escogido. En nuestro caso consisten básicamente en el espesor de la pieza. Para su definición se utiliza el comando R. En el ejemplo se ve como la constante real de numeración 18 toma el valor que se ha asignado en la memoria a la variable ESPESOR18.

Ejemplo:

```
R,18,ESPESOR18,0,0,0,0,0,
```

### 7.2.1.6 Aplicación de cargas

La aplicación de las cargas puede realizarse de varias formas posibles dependiendo del tipo de carga que se quiera aplicar. Se pueden aplicar cargas puntuales, distribuidas en un área o una línea, cargas volumétricas, etc.

En este caso se ha decidido aplicar cargas puntuales en los nodos que forman las superficies en las que según la normativa vigente se aplican las cargas distribuidas así establecidas. Esta operación se lleva a cabo seleccionando los puntos y aplicando la carga establecida mediante el comando F en el que se establecen los nodos a incluir, el sentido de la carga aplicada y el valor de la misma (siendo en el caso del ejemplo la fuerza aplicada en los nodos del rellano).

Ejemplo:

```
F,ALL,Fy,-FRELLANO
```

#### 7.2.1.7 Restricciones

Las restricciones son los impedimentos que se le ponen a ciertos nodos del modelo de forma que no cuenten con el grado de libertad restringido. En este caso los grados de libertad que se impiden son los desplazamientos y giros en los lugares en los que la estructura se fija al edificio.

Estas operaciones de fijación se realizan mediante el comando DL una vez se han seleccionado las líneas que se quieran fijar. En el ejemplo se aprecia cómo se seleccionan las líneas a una determinada coordenada “Y” y se les restringen todos sus grados de libertad.

Ejemplo:

```
LSEL,S,LOC,Y,ALTURACERO,ALTURACERO  
DL,ALL,,ALL,
```

## 8 Creación y análisis del modelo

### 8.1 Funcionamiento general

El código utilizado para el desarrollo de este proyecto se ha dividido en fases para conseguir una sencilla localización de los fallos a lo largo de su creación, es por ello se tiene un archivo maestro desde el que se llaman al resto de funciones. La forma en que se suceden las fases se puede resumir como se expone en la Figura 8

En una primera fase se llama al archivo maestro, denominado “General” que permitirá llamar al resto de funciones.

A continuación se inicializan variables y se empiezan a crear las geometrías de los distintos tramos de escalera, seguido de su sujeción entre ellos mediante los pilares.

Debido a que varios de los elementos tienen espesores distintos se deben asignar sus correspondientes constantes reales. El material utilizado será un acero de 210 GPa de módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson de valor 0,3 y una densidad de  $7.850 \text{ Kg/m}^3$ .

Una vez aplicadas las cargas dictadas en la norma, a saber una carga permanente de  $1.100 \text{ N/m}^2$  y otra variable de  $3.000 \text{ N/m}^2$  con sus correspondientes coeficientes de seguridad, se aplican las restricciones y a partir de este punto el sistema está preparado para que se indique que resuelva el sistema y calcule los resultados.

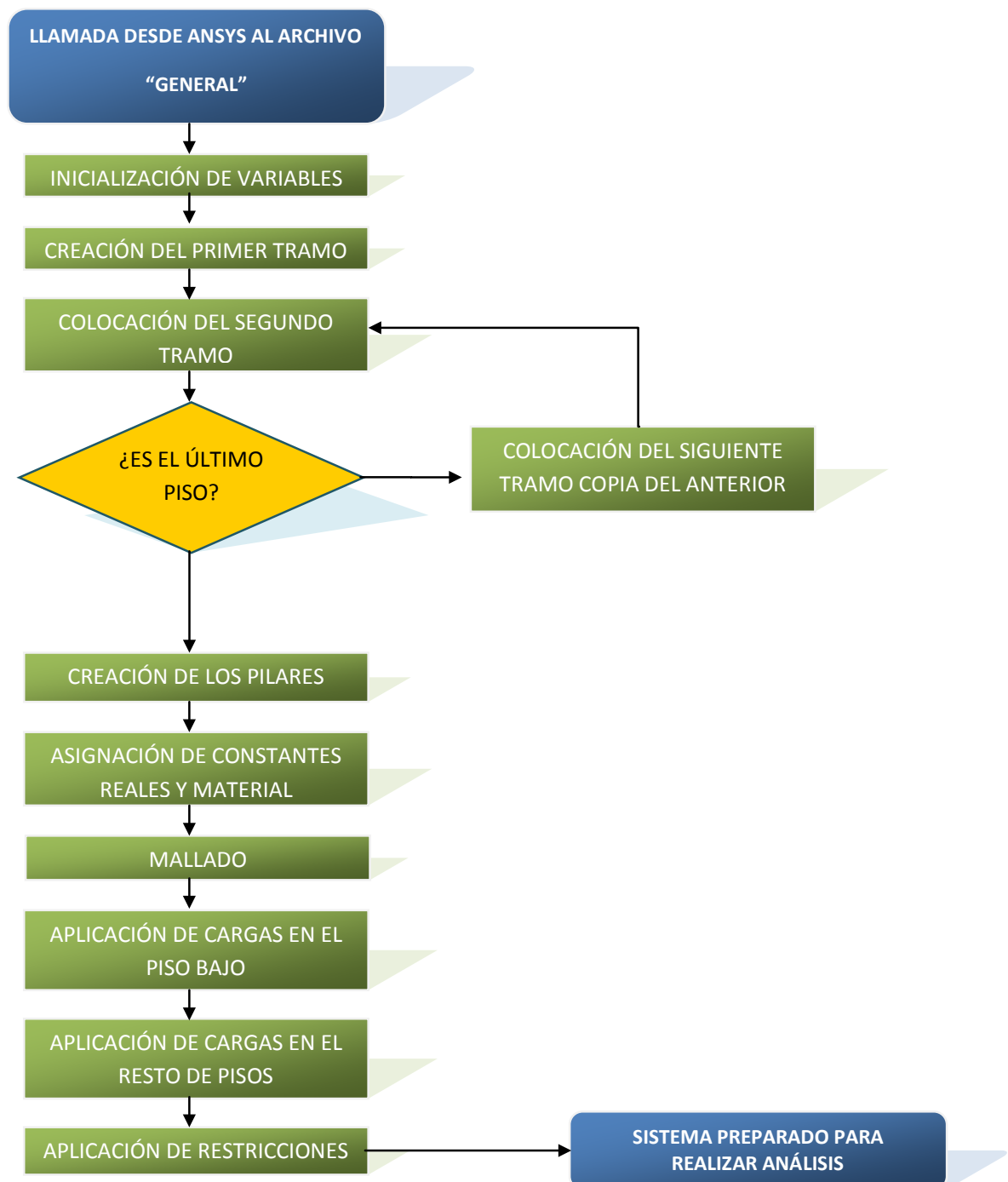


Figura 8: Flujograma de archivo general

## 8.2 Tipo de elemento

En este caso se ha optado por un elemento tipo SHELL63 de tipo placa de tres dimensiones, a elegir entre tres y cuatro nodos, con capacidad para que se le apliquen cargas tanto normales como en la dirección del plano, con seis grados de libertad en cada nodo (Tres de traslación y tres de rotación), capacidad para doblarse o actuar como membrana y cuyo único input es el espesor del elemento a modelar.

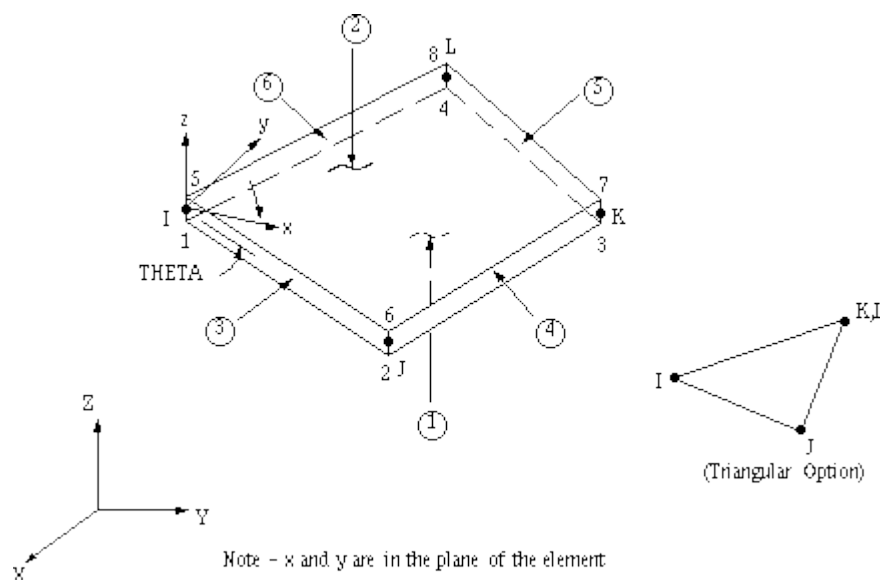


Figura 9: Tipo de elemento SHELL 63

Con este tipo de elemento se está eligiendo un modelo de planos medios, es decir que lo que se representará en ANSYS serán las líneas medias de cada elemento y mediante ellas el programa calculará los resultados.



## 8.3 Creación de la geometría

Al igual que el resto de funciones de código, la creación de los tramos y los pilares sigue una estructura propia y específica. En este caso se puede dividir básicamente en la siguiente serie de procesos:

### 8.3.1 Creación de rellano

Consiste en la creación tanto de los elementos exteriores como de los travesaños interiores (Habiendo sido elegido tanto el número de travesaños como su disposición a lo largo del rellano). El flujo de procesos que se realizan en esta rutina es el siguiente:

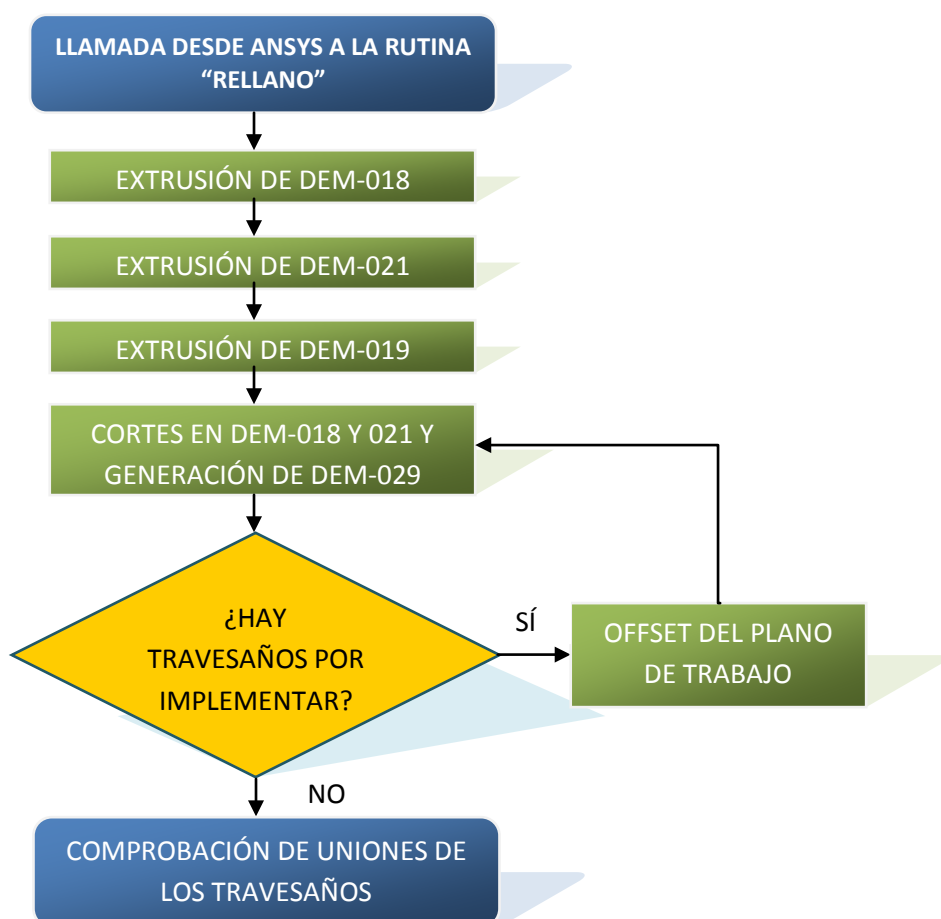


Figura 10: Flujograma de la rutina "RELLANO"

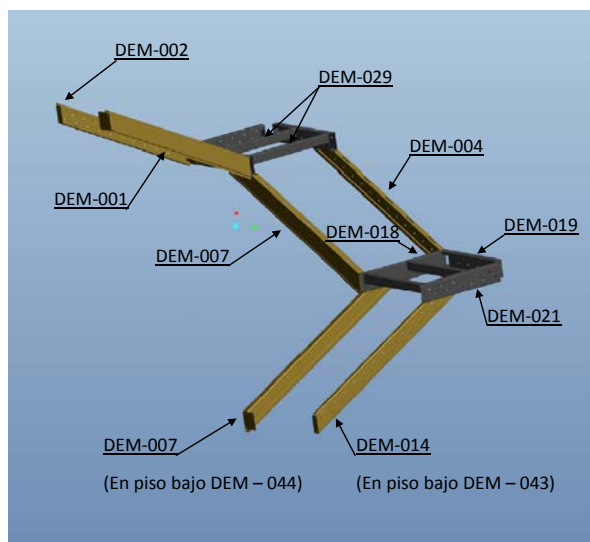


Figura 11: Mapa de identificación de perfiles

### 8.3.2 Creación de vigas inclinadas

Consiste en la creación de los perfiles que conectan un rellano con otro o con la estructura propia del edificio, en concreto con los perfiles de numeración 1,2,4,7,14,43 y 44. Conlleva la mayor dificultad dado que su longitud tanto horizontal como vertical es variable según las dimensiones de entrada, además varias de ellas deben ser acortadas de forma precisa para su ensamblaje con los pilares respectivos.

Su forma de creación básicamente consiste en la creación mediante sus puntos del perfil como tal de la viga para su posterior extrusión a lo largo de un eje, comúnmente constituido por una de sus aristas.

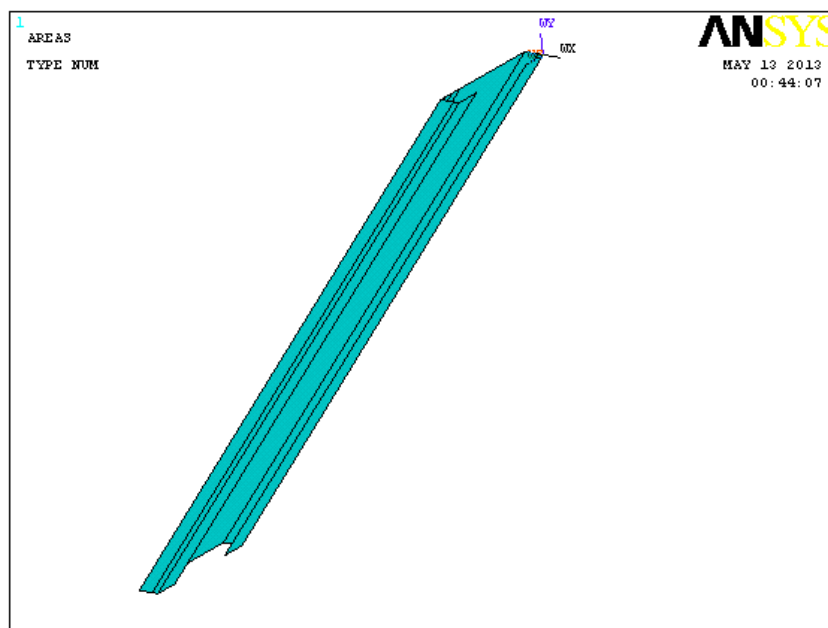


Figura 12: Viga inclinada

### 8.3.3 Ensamblaje de zonas comunes

Consiste en la unificación de elementos compartidos entre dos componentes (como por ejemplo una viga inclinada y un rellano) de forma que se conviertan en uno solo y el sistema lo reconozca como una unión.

Es común que al realizar dos piezas por separado, las líneas y puntos que las definan no sean las mismas en la región que comparten aunque deban formar una unión en esa misma región. En este caso el proceso cobra mucha importancia debido a que esas uniones deben ser las que resistan los esfuerzos, por lo que deben ser lo más sólidas posibles.

En estos casos se ha desarrollado un procedimiento que consiste en cortar las líneas existentes por los lugares correctos de forma que se obtengan como resultado líneas gemelas tanto en una pieza como en la otra que posteriormente se fusionarán en una sola. El resultado es apreciable en el ejemplo de las imágenes:

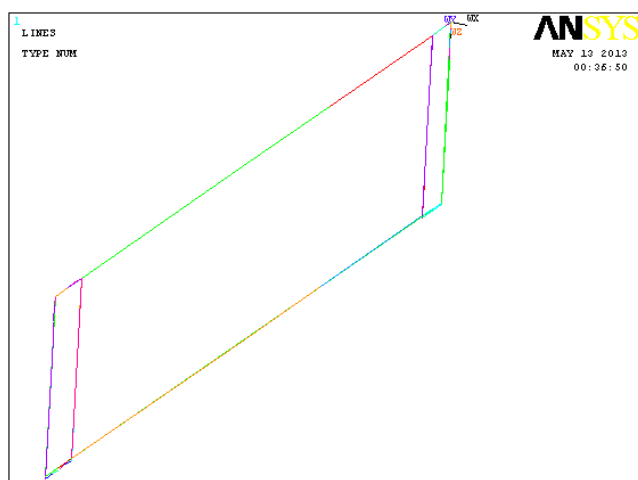


Figura 13: Líneas antes de comprobación

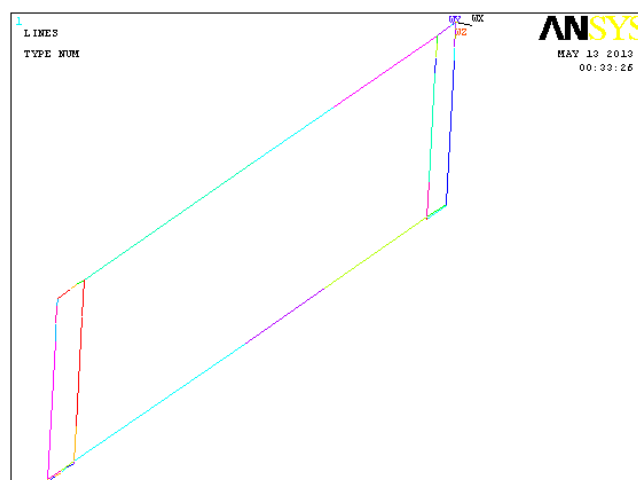


Figura 14: Líneas comprobadas

Se puede apreciar como en la Figura 13 aún hay líneas que se superponen unas encima de otras, mientras que en la Figura 14 se aprecia cómo cada línea es única y no entra en conflicto con ninguna otra.

### 8.3.4 Creación de tramos

Cada tramo de escalera se realiza con variables propias específicamente para él y en cada uno se realizan comprobaciones de que las uniones se están realizando de forma correcta. El flujo de procesos que se realizan en cada una de las creaciones de los tramos puede ser resumido en la Figura 15: Flujograma de funciones “TRAMO” y “TRAMO INICIAL” :

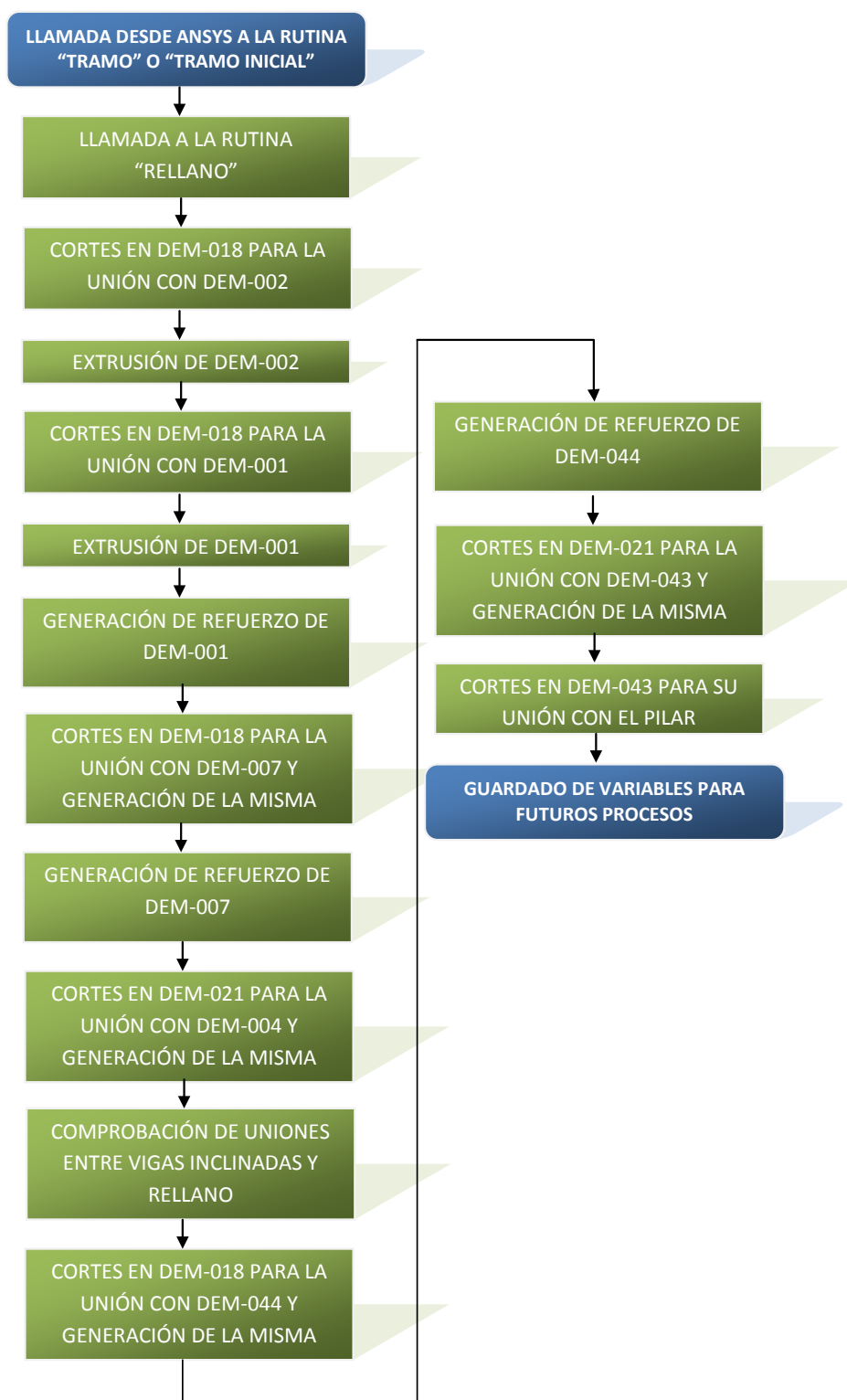


Figura 15: Flujograma de funciones “TRAMO” y “TRAMO INICIAL”

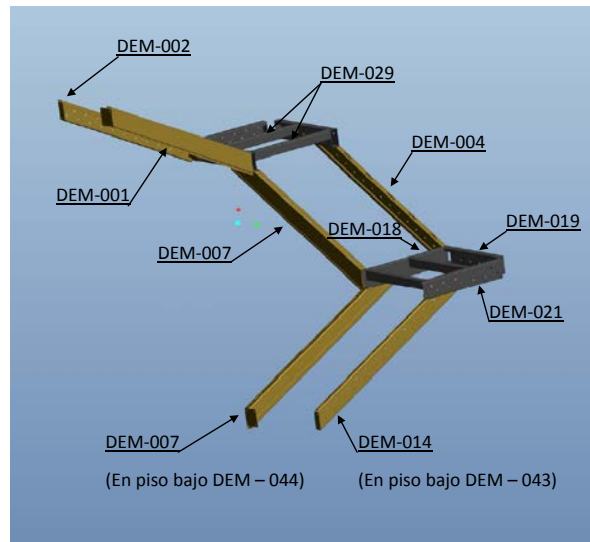


Figura 16: Mapa de identificación de perfiles

### 8.3.5 Creación de pilares

El diseño del perfil de los pilares es un dato a introducir en el modelo, por lo que este proceso consiste en la creación del perfil entregado a la aplicación y su extrusión hasta la altura necesaria. Su disposición final se expone en la Figura 17:

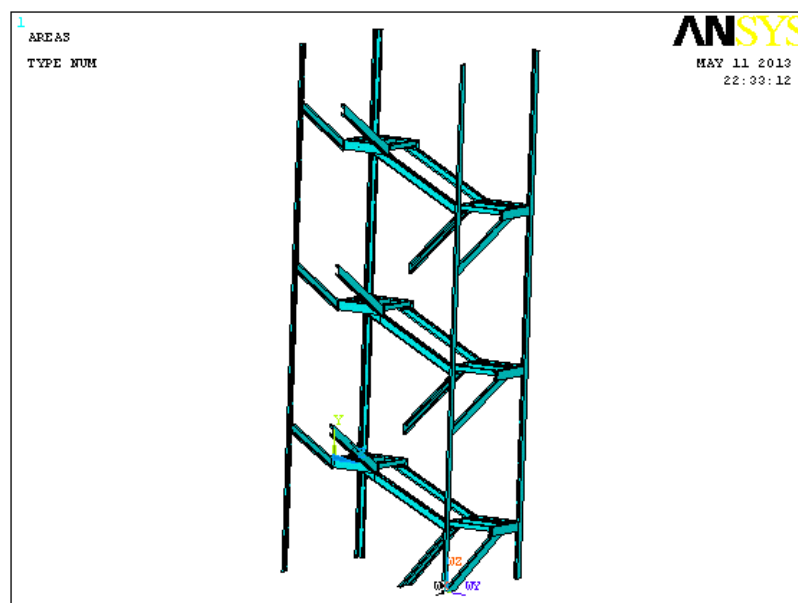


Figura 17: Creación de los pilares

## 8.4 Simplificaciones del modelo

A lo largo de la creación de la geometría de la estructura se han realizado una serie de simplificaciones que deben ser tenidas en cuenta a la hora del análisis de los resultados. Estas simplificaciones se han utilizado para tener un modelo lo más sencillo posible que cumpliera con las exigencias que se deben cumplir por normativa. Todas ellas suponen siempre ponerse del lado de la seguridad y se han tomado teniendo en cuenta las posibles consecuencias de su aplicación.

### 8.4.1 Simplificaciones: Modelo de planos medios

Como consecuencia de haber utilizado elementos del tipo placa se deberá tener en cuenta a la hora de modelar nuestra estructura que lo que se está representando es la cara media de cada placa, es decir que por cada superficie que se represente se deberá saber que en el modelo está creando su plano medio.

Además se han modelado todos los perfiles sin radio de acuerdo entre sus planos debido a que en estudios anteriores sobre otros modelos se comprobó que los valores tensionales no sufren alteraciones debido a este cambio, de esta forma se facilita enormemente el modelado de estos elementos en ANSYS.

### 8.4.2 Simplificaciones: Placas de unión

La mayoría de las uniones entre perfiles del modelo se realizan soldando una placa de metal a uno de los perfiles a unir y atornillando esta placa a otro (En el caso de la Figura 18 se observa el perfil DEM-004 unido a uno de los rellanos).

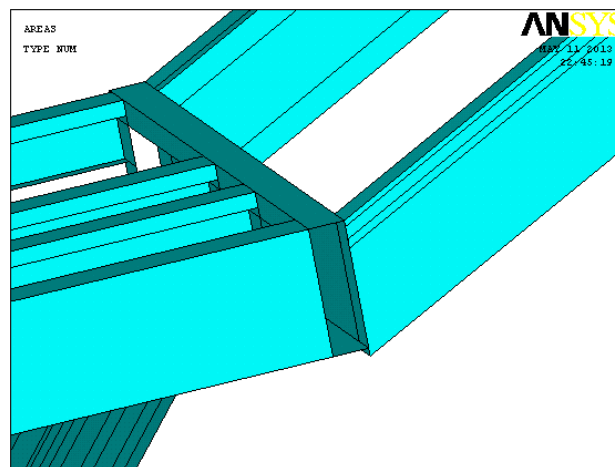


Figura 18: Simplificaciones - Placas de unión

La simplificación realizada consiste en incrementar la longitud total de la viga en una longitud igual a la proyección del espesor de la placa en horizontal (Del orden de 3,4 mm si la placa es de espesor 3 mm y el ángulo del orden de 28 grados) y crear la unión entre piezas mediante soldaduras. De esta forma se consigue que el modelado de la estructura sea más simple sin que los resultados se vean afectados. Como más adelante se explicará, en caso de obtener resultados incoherentes en las zonas en que se realice esta simplificación se puede proceder a modelar determinada unión de una forma que se acerque aún más a la realidad.

#### 8.4.3 Simplificaciones: Unión a las paredes del edificio

A lo largo de toda la estructura externa de la escalera se puede observar como esta se va anclando mediante sujeciones a las paredes del edificio. Debido a que no se puede conocer el grado de rigidez que estas uniones pueden aportar a la estructura (ya que dependerá en cada caso de instalación) se ha optado por no tomarlas en cuenta. Las únicas sujeciones que se han tomado como válidas son aquellas que unen el modelo al forjado y aquellas que lo unen a la base del edificio dado que de estas últimas si se puede asegurar que actuarán como empotramientos. En la Figura 19 se observa el diseño original en el lado izquierdo y en el derecho el modelo creado.

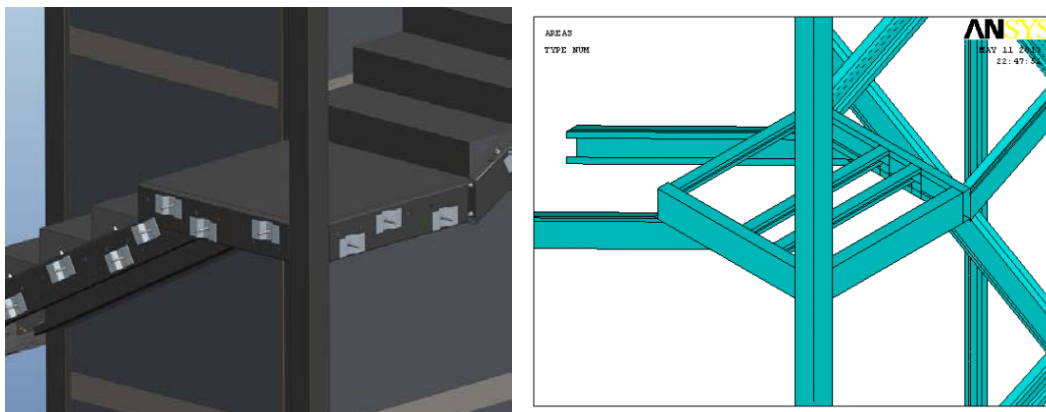


Figura 19: Simplificaciones - Unión a paredes

#### 8.4.4 Simplificaciones: Unión a pilar

En varias de las uniones del modelo real provisto por el fabricante se puede apreciar que hay una distancia de 0,5 mm entre las superficies exteriores del pilar y una de las vigas del rellano (En concreto la de perfil DEM-019). En realidad esa unión vendría dada por la soldadura de una placa al perfil de la viga y esta placa a su vez se atornillada al pilar, pero a la hora de hacer un modelo en ANSYS si se representa de manera fiel el modelo se obtiene en ese punto un pico de tensiones debido a que el programa interpreta que sólo se está sujetando la viga mediante dos soldaduras en las partes superior e inferior del perfil. En las figuras 20 y 21 se exponen el caso real y el modelado.

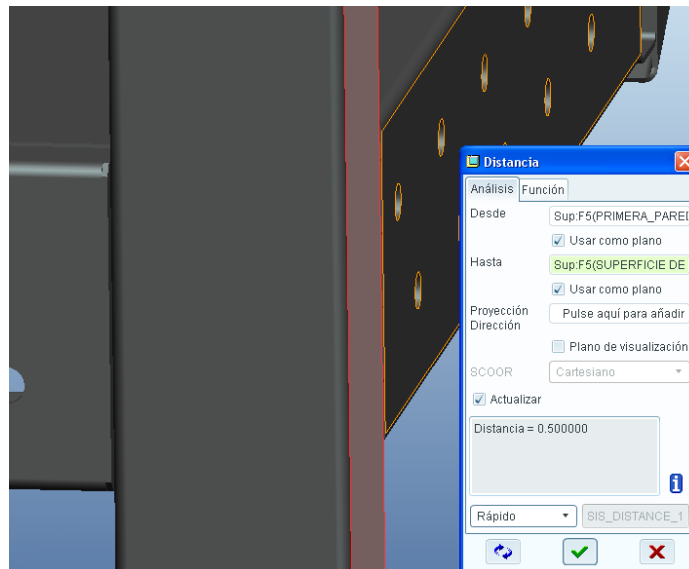


Figura 20: Unión a pilar en diseño

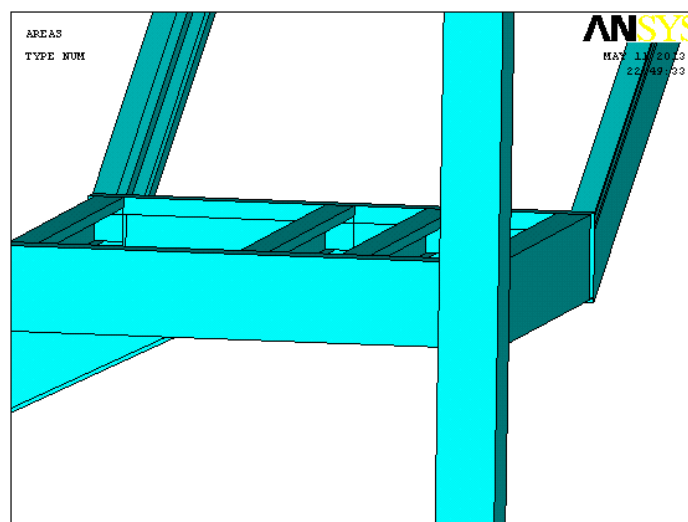


Figura 21: Simplificaciones - Unión a pilar en modelo

Debido a todo esto se ha decidido modelar esta unión sin esa diferencia de medio milímetro de forma que el programa pueda interpretar correctamente las sujeciones de la viga y se obtengan valores más aproximados a la realidad



#### 8.4.5 Simplificaciones: Aplicación de las cargas

Como es de suponer, en una escalera las cargas se aplican normalmente en los escalones y placas de los rellanos de la misma. En este caso se ha optado por no modelar los escalones ni placas dado que su inclusión complicaría enormemente el modelado, si no que se ha optado por aplicar la carga directamente en la estructura fundamental de la misma. De esta forma la manera de proceder será la siguiente:

- 1) Cálculo del valor de las fuerzas a aplicar (Ver apartado 8.7 )
- 2) Selección de los nodos del modelo en los que se pueden aplicar esas cargas
- 3) Aplicación de las mismas

En las siguientes imágenes se puede ver el modelo inicial, el modelo creado y este último también con las cargas aplicadas.

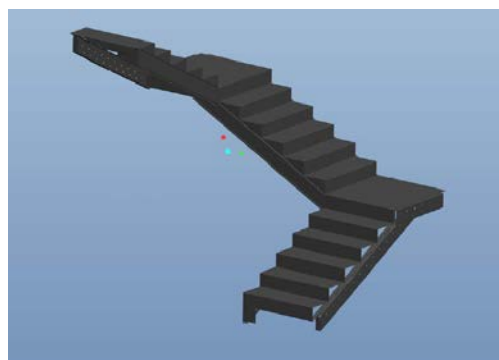


Figura 22: Tramo con escalones

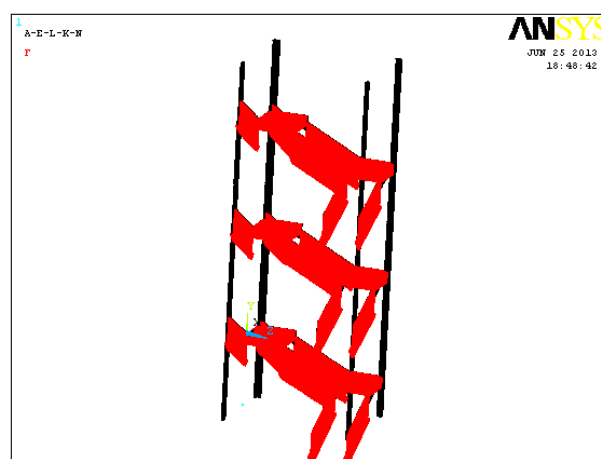
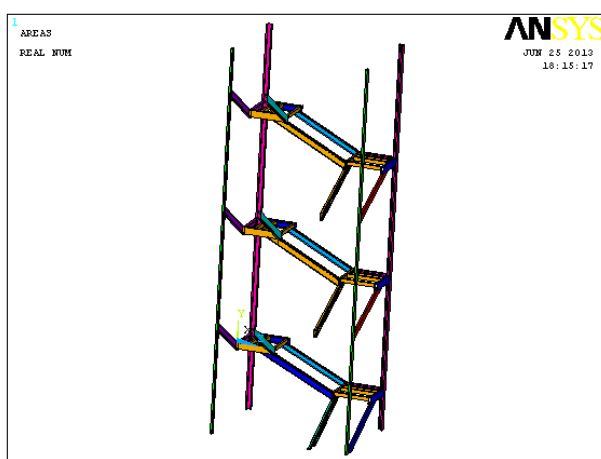


Figura 23: Estructura sin cargas y con cargas

## 8.5 Asignación de constantes reales y material

Como ya se ha comentado anteriormente, no todos los perfiles tienen por qué tener las mismas características como por ejemplo igual espesor o estar contruidos con el mismo material. Es por eso que en el proceso de asignaciones se eligen los componentes específicos y se les asigna un valor propio independiente del resto de perfiles.

En este caso que nos ocupa los elementos que se diferencian del resto son únicamente los refuerzos propios de los tramos inclinados de la parte interior de la estructura, dado que cuentan con un espesor menor que el resto de los perfiles (1,5 mm en lugar de los 3 mm convencionales). En el modelo programado se le asigna a cada pieza unas constantes reales propias de forma que en el caso en que se necesite una modificación de las mismas se pueda hacer sin esfuerzos adicionales. En la Figura 24 se observa cómo cada tipo de pieza tiene un color distinto dependiendo de las constantes reales que la compongan.

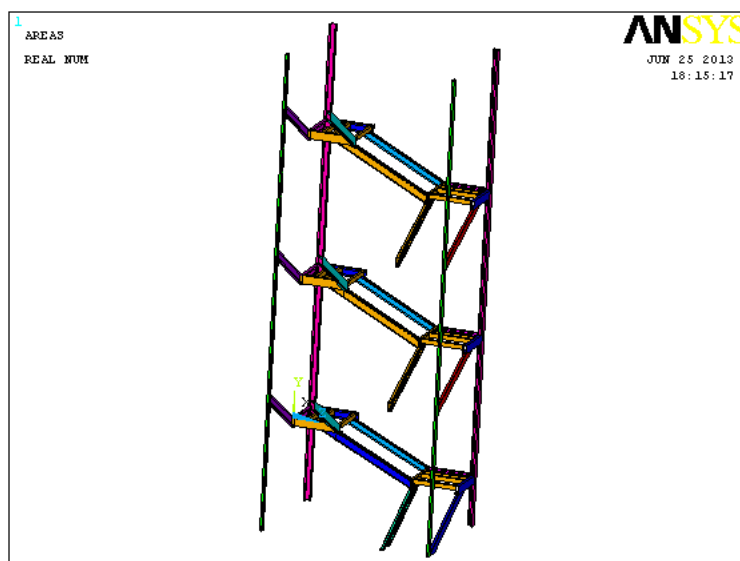


Figura 24: Distintas constantes reales de cada pieza

## 8.6 Mallado

En el modelo que se ha modelado para este proyecto se han utilizado un tamaño de mallado de 2 mm en las zonas con mayor gradiente de tensión y un mallado de 20 mm para el resto. Además el tipo de elemento de malla utilizado ha sido de forma cuadrangular.

## 8.7 Cálculo y aplicación de cargas

Las cargas a aplicar son las propias del estado de servicio de la estructura, vienen estipuladas en el “Documento Básico SE-AE” [MINISTERIO DE FOMENTO, 2009] para cada situación específica y una vez aplicadas no se debe superar la capacidad portante del edificio. Es por ello que se estudian los estados límite, es decir, los estados que al ser superados pueden no cumplirse algunos de los requerimientos estructurales para los que ha sido concebida la estructura. Pueden ser de dos tipos:

- **Estado límite de servicio:** *Son aquellos que, de ser superados, afectan al confort y al bienestar de los usuarios o de terceras personas, al correcto funcionamiento de del edificio o a la apariencia de la construcción.*
- **Estado límite último:** *Son aquellos que, de ser superados, constituyen un riesgo para las personas, ya sea porque producen una puesta fuera de servicio del edificio o el colapso total o parcial del mismo.*

En este caso se va a hacer un estudio del **estado límite último**, de forma que se podrá conocer el punto hasta el que la estructura empieza a dejar de ser segura.

Hay diferentes tipos de acciones a las que puede estar sometida una estructura como la que se está estudiando:

- **Acciones permanentes (G):** *Son aquellas que actúan en todo instante sobre el edificio con posición constante. Su magnitud puede ser constante (como el peso propio de los elementos constructivos o las acciones y empujes del terreno) o no (como las acciones reológicas o el pretensado), pero con variación despreciable o tendiendo monótonamente hasta un valor límite.*
- **Acciones variables (Q):** *Son aquellas que pueden actuar o no sobre el edificio, como las debidas al uso o las acciones climáticas.*
- **Acciones accidentales (A):** *Son aquellas cuya probabilidad de ocurrencia es pequeña pero de gran importancia, como sismo, incendio, impacto o explosión.*

Las deformaciones impuestas (asientos, retracción, etc.) se considerarán como acciones permanentes o variables, atendiendo a su variabilidad.

### 8.7.1 Zona de aplicación

Como ya se ha explicado anteriormente, la aplicación de las cargas se realizará directamente en la estructura básica de la escalera, sin tener en cuenta los escalones o las planchas de los rellanos. Es decir, las zonas de aplicación de cargas serán básicamente las zonas que en el modelo real reciban esos esfuerzos, en este caso se limitan a la parte superior de las vigas del rellano y de las vigas inclinadas.

Además estas cargas serán aplicadas como cargas puntuales en cada nodo en vez de en forma de carga distribuida debido a la problemática que conlleva aplicar cargas distribuidas en superficies inclinadas en ANSYS, de esta forma se obtienen resultados más acordes a la realidad

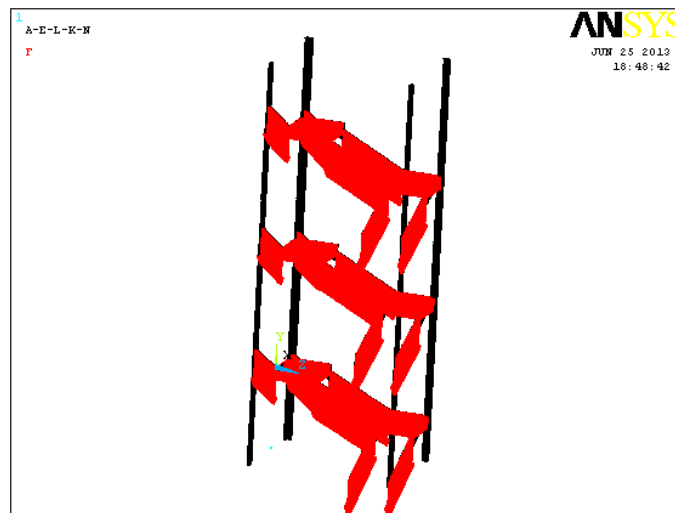


Figura 25: Cargas aplicadas en la estructura

### 8.7.2 Valores a aplicar

Según el “Documento Básico- SE” [MINISTERIO DE FOMENTO, 2009], *el valor de cálculo de los efectos de las acciones correspondiente a una situación persistente o transitoria, se determina mediante combinaciones de acciones a partir de la expresión*

Ecuación 1

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Es decir, considerando la actuación simultánea de:

- Todas las acciones permanentes, en valor de cálculo ( $\gamma_{G,j} \cdot G_{k,j}$ ), incluido el pretensado ( $\gamma_P \cdot P$ );
- Una acción variable cualquiera, en valor de cálculo ( $\gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1}$ ), debiendo adoptarse como tal una tras otra sucesivamente en distintos análisis;
- El resto de las acciones variables, en valor de cálculo de combinación ( $\gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} Q_{k,i}$ )

Los valores de los coeficientes de seguridad,  $\gamma$ , se establecen en la tabla 4.1 para cada tipo de acción, atendiendo para comprobaciones de resistencia a si su efecto es desfavorable o favorable, considerada globalmente.

**Tabla 4.1 Coeficientes parciales de seguridad ( $\gamma$ ) para las acciones**

Tipo de verificación <sup>(1)</sup>	Tipo de acción	Situación persistente o transitoria	
		desfavorable	favorable
<b>Resistencia</b>	Permanente		
	Peso propio, peso del terreno	1,35	0,80
	Empuje del terreno	1,35	0,70
	Presión del agua	1,20	0,90
	Variable	1,50	0
<b>Estabilidad</b>		desestabilizadora	estabilizadora
	Permanente		
	Peso propio, peso del terreno	1,10	0,90
	Empuje del terreno	1,35	0,80
	Presión del agua	1,05	0,95
	Variable	1,50	0

<sup>(1)</sup> Los coeficientes correspondientes a la verificación de la resistencia del terreno se establecen en el DB-SE-C

**Tabla 1: Coeficientes parciales de seguridad para las acciones**

Como se puede ver en la Tabla 1 propia del “Documento Básico SE-AE” [MINISTERIO DE FOMENTO, 2009], en este caso únicamente se tiene como carga permanente la del peso propio de la estructura y como carga variable la que se debe a la sobrecarga de uso. A continuación se expone la definición de ambas según el “Documento Básico – SE” [MINISTERIO DE FOMENTO, 2009]:

#### a) Cargas debidas al peso propio de la estructura

*Consisten en el esfuerzo que sufre la estructura debido al peso de sus componentes y como es natural tiene siempre aplicación en dirección vertical sentido hacia el suelo. En este caso se va a tener en cuenta las cargas debidas al peso de la estructura básica y también a los pesos de escalones y planchas de rellano.*

Las cargas propias de la estructura son fácilmente calculables por el programa y únicamente se deberá introducir el valor de la gravedad y la densidad de los materiales que forman la estructura, en este caso la gravedad toma el valor de  $9,81 \text{ m/s}^2$  (Con un coeficiente de seguridad de 1,35 elegido según los criterios de la Tabla 1) y debido a que se utiliza un acero típico la densidad será de  $7.850 \text{ Kg/m}^3$ .

En cuanto al peso del resto de elementos el “Documento Básico SE” [MINISTERIO DE FOMENTO, 2009] lo regula de la siguiente manera:

*“El peso propio a tener en cuenta es el de los elementos estructurales, los cerramientos y elementos separadores, la tabiquería, todo tipo de carpinterías, revestimientos (como pavimentos, guarnecidos, enlucidos, falsos techos), rellenos (como los de tierras) y equipo fijo.*

*El valor característico del peso propio de los elementos constructivos, se determinará, en general, como su valor medio obtenido a partir de las dimensiones nominales y de los pesos específicos medios. En el Anejo C se incluyen los pesos de materiales, productos y elementos constructivos típicos.”*

En este caso y después de consultar la Tabla 2 originaria del “Documento Básico SE-AE” [MINISTERIO DE FOMENTO, 2009] se puede verificar que la carga para los materiales a instalar (Se ha elegido la Baldosa hidráulica de 0.07 m de espesor total por ser el de mayor peso como medida de seguridad) tiene un peso por unidad de superficie de 1,1 kN/m<sup>2</sup>.

**Tabla C.3 Peso por unidad de superficie de elementos de pavimentación**

Materiales y elementos	Peso kN/m <sup>2</sup>	Materiales y elementos	Peso kN/m <sup>2</sup>
Baldosa hidráulica o cerámica (incluyendo material de agarre)		Linóleo o loseta de goma y mortero	
0,03 m de espesor total	0,50	20 mm de espesor total	0,50
0,05 m de espesor total	0,80	Parque y tarima de 20 mm de espesor sobre rastreles	0,40
0,07 m de espesor total	1,10	Tarima de 20 mm de espesor rastreles recibidos con yeso	0,30
Corcho aglomerado		Terrazo sobre mortero, 50 mm espesor	0,80
tarima de 20 mm y rastrel	0,40		

**Tabla 2: Peso por unidad de superficie de elementos de pavimentación**

## b) Sobrecargas de uso

Según el “Documento Básico SE - AE” [MINISTERIO DE FOMENTO, 2009] una sobrecarga de uso es “el peso de todo lo que puede gravitar sobre el edificio por razón de su uso. Por lo general, los efectos de la sobrecarga de uso pueden simularse por la aplicación de una carga distribuida uniformemente. De acuerdo con el uso que sea fundamental en cada zona del mismo, como valores característicos se adoptarán los de la Tabla 3.1. Dichos valores incluyen tanto los efectos derivados del uso normal, personas, mobiliario, enseres, mercancías habituales, contenido de los conductos, maquinaria y en su caso vehículos, así como las derivadas de la utilización poco habitual, como acumulación de personas, o de mobiliario con ocasión de un traslado.”

*“En las zonas de acceso y evacuación de los edificios de las zonas de categorías A y B, tales como portales, mesetas y escaleras, se incrementará el valor correspondiente a la zona servida en 1 kN/m<sup>2</sup>.”*

Tabla 3.1. Valores característicos de las sobrecargas de uso

Categoría de uso		Subcategorías de uso		Carga uniforme [kN/m <sup>2</sup> ]	Carga concentrada [kN]
A	Zonas residenciales	A1	Viviendas y zonas de habitaciones en, hospitales y hoteles	2	2
		A2	Trasteros	3	2
B	Zonas administrativas			2	2
C	Zonas de acceso al público (con la excepción de las superficies pertenecientes a las categorías A, B, y D)	C1	Zonas con mesas y sillas	3	4
		C2	Zonas con asientos fijos	4	4
		C3	Zonas sin obstáculos que impidan el libre movimiento de las personas como vestíbulos de edificios públicos, administrativos, hoteles; salas de exposición en museos; etc.	5	4
		C4	Zonas destinadas a gimnasio u actividades físicas	5	7
		C5	Zonas de aglomeración (salas de conciertos, estadios, etc)	5	4
D	Zonas comerciales	D1	Locales comerciales	5	4
		D2	Supermercados, hipermercados o grandes superficies	5	7
E	Zonas de tráfico y de aparcamiento para vehículos ligeros (peso total < 30 kN)			2	20 <sup>(1)</sup>
F	Cubiertas transitables accesibles sólo privadamente <sup>(2)</sup>			1	2
G	Cubiertas accesibles únicamente para conservación <sup>(3)</sup>	G1 <sup>(7)</sup>	Cubiertas con inclinación inferior a 20°	1 <sup>(4)(6)</sup>	2
			Cubiertas ligeras sobre correas (sin forjado) <sup>(5)</sup>	0,4 <sup>(4)</sup>	1
		G2	Cubiertas con inclinación superior a 40°	0	2

Tabla 3: Valores característicos de las sobrecargas de uso

Por lo tanto como sobrecarga de uso se tendrá una carga variable distribuida de 3 kN/m<sup>2</sup> (Estando compuesta por los 2 kN/m<sup>2</sup> sugeridos en la Tabla 3 y el valor a añadir de 1 kN/m<sup>2</sup> comentado anteriormente) con un coeficiente de seguridad de 1,5 por ser una carga variable.

De esta manera se especifica que se deben aplicar unas cargas distribuidas de valor:

**Permanente:**

Ecuación 2

$$G = 1.100 \cdot 1,35 = 1.485 \text{ N/m}^2$$

**Variable:**

Ecuación 3

$$Q = 3.000 \cdot 1,5 = 4.500 \text{ N/m}^2$$

Por otra parte se ha concluido que se van a aplicar las cargas de forma puntual en cada nodo, de manera que se deberá calcular la fuerza que se aplica en cada superficie (Multiplicando esta carga distribuida por el área de cada superficie), calcular el número de nodos en que se divide la misma y dividir esa fuerza total entre el número de nodos.

Además a la hora de calcular estas áreas hemos de tener en cuenta que para las cargas variables sólo son significativas las proyecciones horizontales de cada una puesto que esa es su zona de aplicación, sin embargo en las cargas permanentes se deberá tener en cuenta que la contrahuella de los escalones también aporta valor a la carga por lo que las fórmulas para calcular estas fuerzas serán las siguientes:

**Rellanos:**

Ecuación 4

$$Fuerza = 1,35 \cdot G \cdot \text{Área rellano} + 1,5 \cdot Q \cdot \text{Área rellano}$$

**Tramos inclinados:**

Ecuación 5

$$Fuerza = 1,35 \cdot G \cdot (\text{Área}_{\text{Proyección horizontal}} + \text{Área}_{\text{Proyección vertical}}) + 1,5 \cdot Q \cdot \text{Área}_{\text{Proyección horizontal}}$$

Siendo así, los valores de las áreas solicitadas serán:

Tipo de superficie	Valor (m <sup>2</sup> )
Área de rellano	0,988
Área de proyección horizontal de tramo superior	1,497
Área de proyección vertical de tramo superior	0,908
Área de proyección horizontal de tramo medio	1,482
Área de proyección vertical de tramo medio	0,908
Área de proyección horizontal de tramo inferior	1,480
Área de proyección vertical de tramo inferior	0,908

Tabla 4: Cálculo de áreas de superficie para aplicación de cargas

Por lo tanto las cargas totales a dividir posteriormente entre el número de nodos será:

Lugar de aplicación	Valor (N)
Rellano	5.913,4
Tramo superior	10.304,4
Tramo medio	10.215,0
Tramo inferior	10.209,1

Tabla 5: Valores de las fuerzas a aplicar en cada superficie

El número de nodos dependerá del mallado que se haya realizado y de las dimensiones que tengan las piezas por lo que no se va a definir en este documento la fuerza a aplicar en cada nodo.



### 8.7.3 Comparación con resistencia del material

Se considera que hay suficiente resistencia de la estructura portante, de un elemento estructural, sección, punto o de una unión entre elementos, si para todas las situaciones de dimensionado pertinentes, se cumple la siguiente condición.

Ecuación 6

$$E_d < R_d$$

Siendo:

Ed: Valor de cálculo del efecto de las acciones

Rd: Valor de cálculo de la resistencia correspondiente

En este caso la resistencia del material al haber elegido un acero típico S275 se tiene que es de 275 MPa, teniendo en cuenta un coeficiente de seguridad de 1.05, tal y como se especifica en la Tabla 6 originaria del “Documento Básico SE-A” [MINISTERIO DE FOMENTO, 2008] por tener todos los perfiles un espesor menor de 16 mm:

Tabla 4.1 Características mecánicas mínimas de los aceros UNE EN 10025

DESIGNACIÓN	Espesor nominal t (mm)				Temperatura del ensayo Charpy °C
	Tensión de límite elástico			Tensión de rotura f <sub>u</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	
	f <sub>y</sub> (N/mm <sup>2</sup> )				
	t ≤ 16	16 < t ≤ 40	40 < t ≤ 63		
S235JR	235	225	215	360	20
S235J0					0
S235J2					-20
S275JR	275	265	255	410	20
S275J0					0
S275J2					-20
S355JR	355	345	335	470	20
S355J0					0
S355J2					-20
S355K2					-20 <sup>(1)</sup>
S450J0	450	430	410	550	0

<sup>(1)</sup> Se le exige una energía mínima de 40J.

<sup>(1)</sup> Se le exige una energía mínima de 40J.

Tabla 6: Características mecánicas de los aceros UNE EN 10025

Según el “Documento Básico SE-A” [MINISTERIO DE FOMENTO,2008] la normativa exige lo siguiente:  
*“Aunque en el caso de las clases 1 y 2 es una opción holgadamente segura, es admisible utilizar en cualquier caso criterios de comprobación basados en distribuciones elásticas de tensiones, siempre que en ningún punto de la sección, (y en clase 4, considerando sólo la eficaz), las tensiones de cálculo, combinadas conforme al criterio de plastificación de Von Mises, superen la resistencia de cálculo. En un punto de una chapa sometido a un estado plano de tensión sería:*

Ecuación 7

$$\sqrt{\sigma_{xd}^2 + \sigma_{zd}^2 - \sigma_{xd} \cdot \sigma_{zd} + 3 \cdot \tau_{xzd}^2} \leq f_{yd}$$

*El valor del límite elástico utilizado será el correspondiente al material base según se indica en el apartado 3 de este DB. No se considerará el efecto de endurecimiento derivado del conformado en frío o de cualquier otra operación.”*

Por otra parte la clasificación 1 y 2 de la que se habla pasa a ser detallada de esta manera:

- **Clase 1 - Plástica:** Permiten la formación de la rótula plástica con la capacidad de rotación suficiente para la redistribución de momentos.
- **Clase 2 – Compacta:** Permiten el desarrollo del momento plástico con una capacidad de rotación limitada.
- **Clase 3 - Semicompacta o Elástica:** En la fibra más comprimida se puede alcanzar el límite elástico del acero pero la abolladura impide el desarrollo del momento plástico
- **Clase 4 – Esbelta:** Los elementos total o parcialmente comprimidos de las secciones esbeltas se abollan antes de alcanzar el límite elástico en la fibra más comprimida.

En nuestro caso se cumple la condición de que sea una clase 1 o 2 y por lo tanto la forma de certificar los resultados será obtener en ANSYS un estudio de los estados tensionales de Von Mises de la estructura y ver si alguno de esos valores supera el límite elástico del material que, como se ha visto en la Tabla 6, es de 275 MPa entre un coeficiente de seguridad de  $\gamma_M$  de 1,05 propio del acero.

Ecuación 8

$$f_{yd} = R_d = \frac{f_0}{\gamma_0} = \frac{275}{1,05} = 261,09 \text{ MPa}$$

#### 8.7.4 Aplicación de restricciones

Se llama restricciones a los anclajes que se deben imponer al modelo para que se comporte como en la vida real, es decir, los mismos anclajes que tiene la estructura en realidad. En este caso los anclajes que se observan son aquellos que fijan la estructura a la base del edificio, aquellos que la fijan a los forjados de las distintas plantas (Ambos en amarillo en la Figura 26) y, en el caso de algunas uniones en las que se ha mejorado la representación de sus fijaciones, aquellos que unen mediante la simulación de tornillos ciertas partes de la estructura (en verde).

Se han obviado los anclajes propios de la parte superior de la estructura donde se encuentra la maquinaria del ascensor dado que no constituyen ninguna mejora a la precisión del modelo y puesto que en el diseño original no constan de un anclaje al forjado.

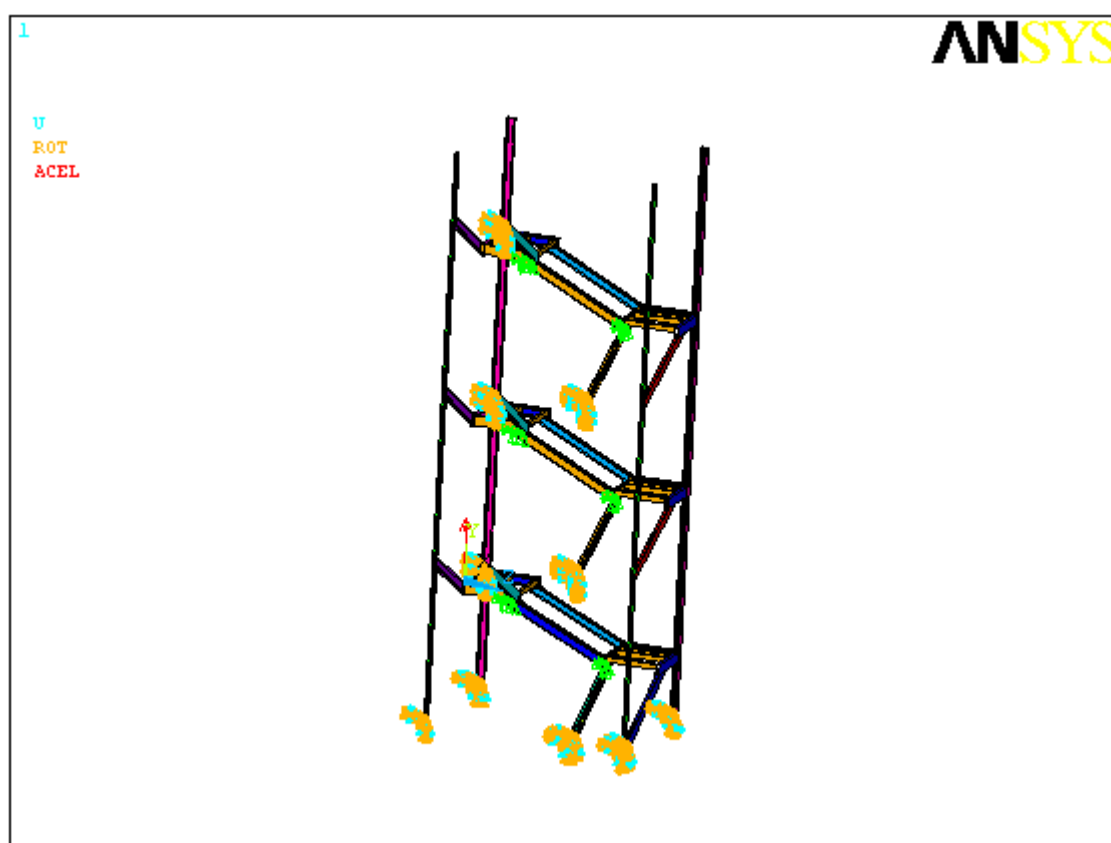


Figura 26: Restricciones del modelo

## 9 Obtención de resultados y verificación

Una vez explicados todos los procedimientos que se siguen para el cálculo del estado tensional de la estructura y el funcionamiento de los mismos se va a proceder a realizar el ensayo de la viabilidad estructural del conjunto con los datos siguientes proporcionados por el fabricante:

- Ancho de hueco de escalera: 3,5 m
- Largo de hueco de escalera: 2,5 m
- Ancho de tramo: 1 m
- Altura del piso bajo: 2.76839 m
- Altura del resto de plantas: 2.89643 m
- Hueco entre plantas: 0.0215583 m
- Número de pisos: 3
- Número de travesaños en rellano: 2
- Posición de travesaños: Figura 28

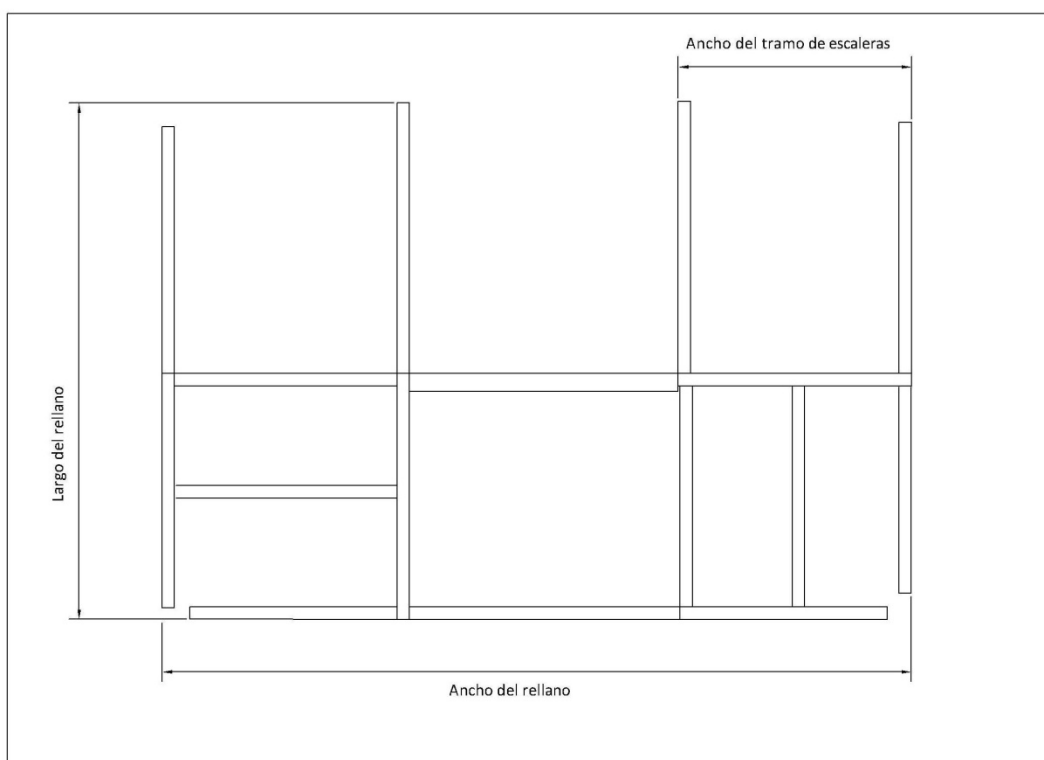


Figura 27: Disposición de dimensiones I

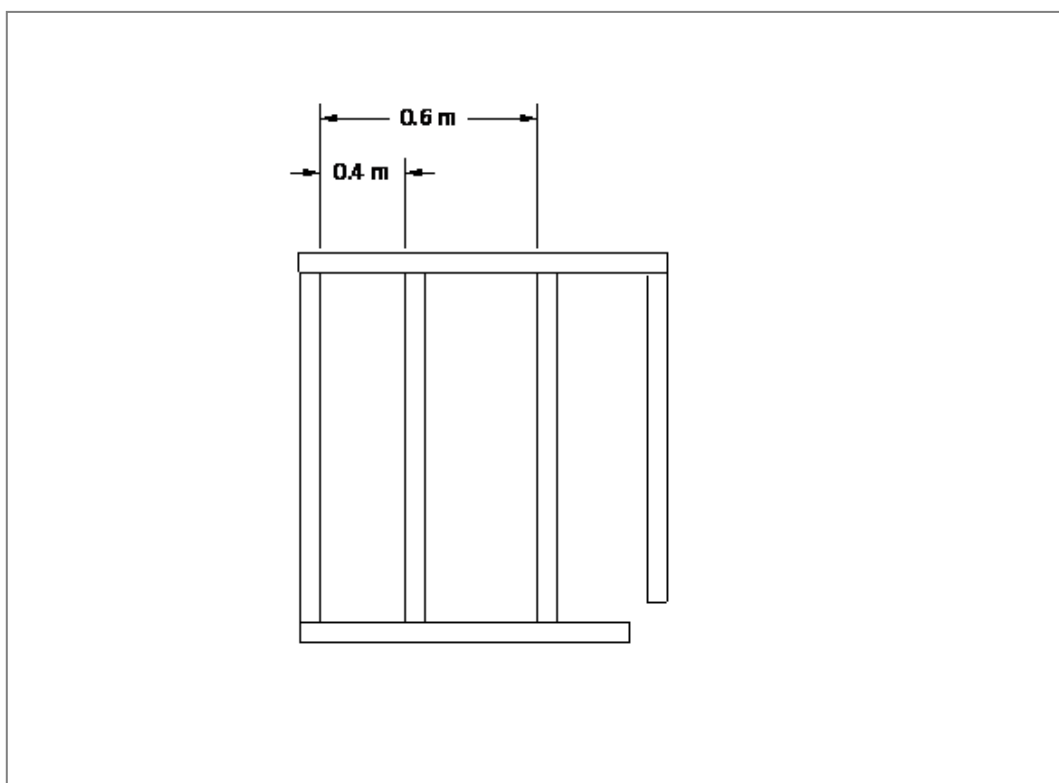


Figura 28: Disposición de dimensiones II

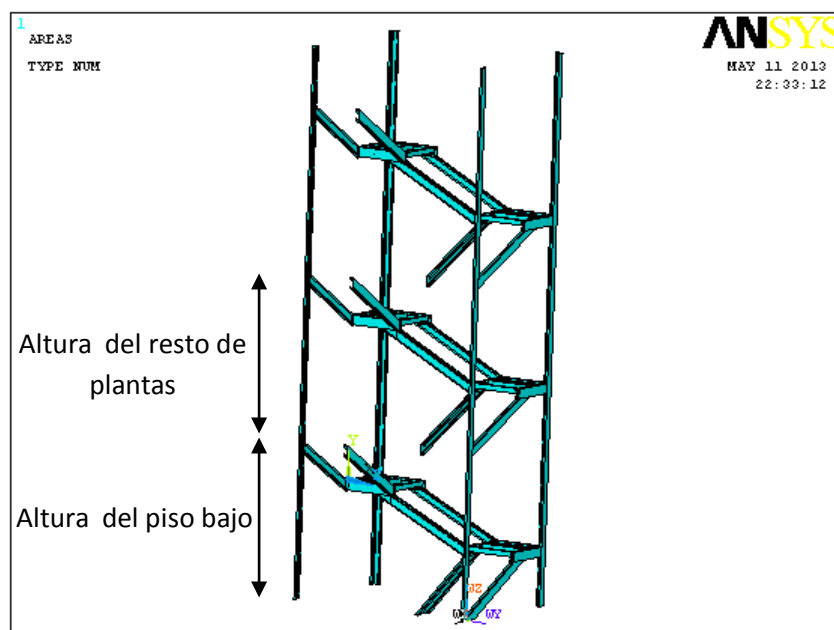


Figura 29: Disposición de dimensiones III

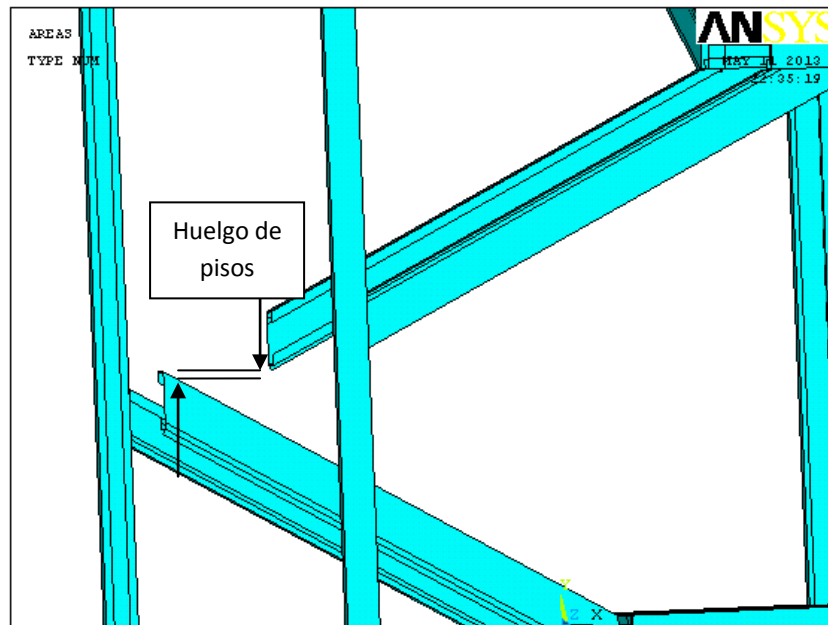


Figura 30: Huelgo de pisos

Además de estos parámetros también se deben introducir en el programa las dimensiones de los perfiles que se van a utilizar, en este caso se pueden encontrar todas las dimensiones de los perfiles utilizados en los anexos de este documento.

En anteriores ensayos se ha podido apreciar que el valor tensional máximo alcanzado en la estructura sobrepasa los 261,09 MPa, es decir, el límite propuesto por la normativa vigente de seguridad anteriormente calculado es rebasado con bastante rotundidad y por tanto la estructura plastificaría infringiendo dicha normativa.

Esta situación se da en principio en varias zonas: El extremo de la viga DEM-018 en unión con la viga inclinada DEM-002 (Problema tensional I), el extremo de la viga de rellano DEM-021 en unión con un de los pilares (Problema tensional II), en las uniones de rellanos con la viga inclinada DEM-007 situada inferiormente a ellos (Problema tensional III), en los anclajes de la estructura al forjado (Problema tensional IV) y en la unión del último piso entre el rellano y la viga inclinada DEM-004 (Problema tensional V)

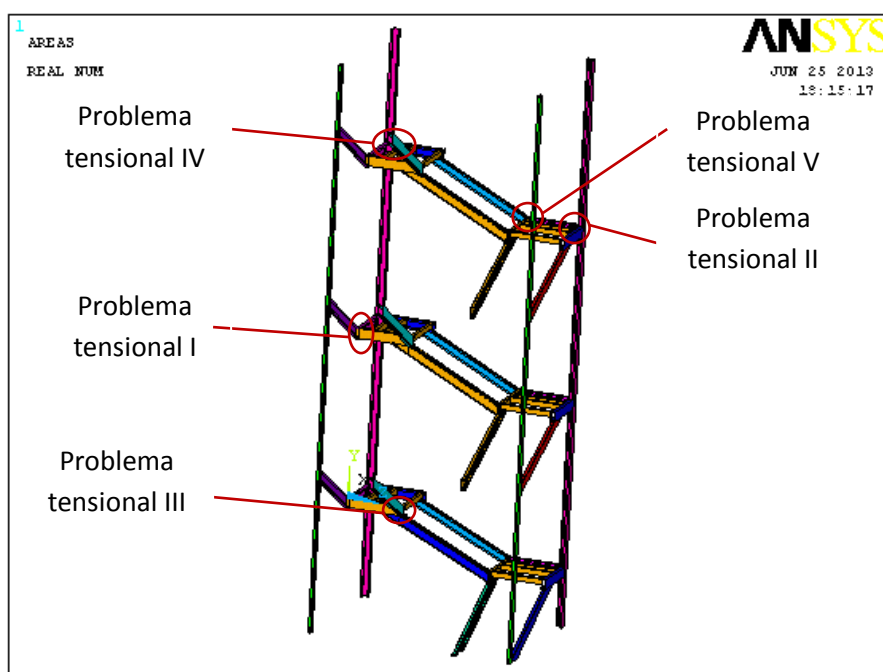


Figura 31: Situación de los problemas tensionales

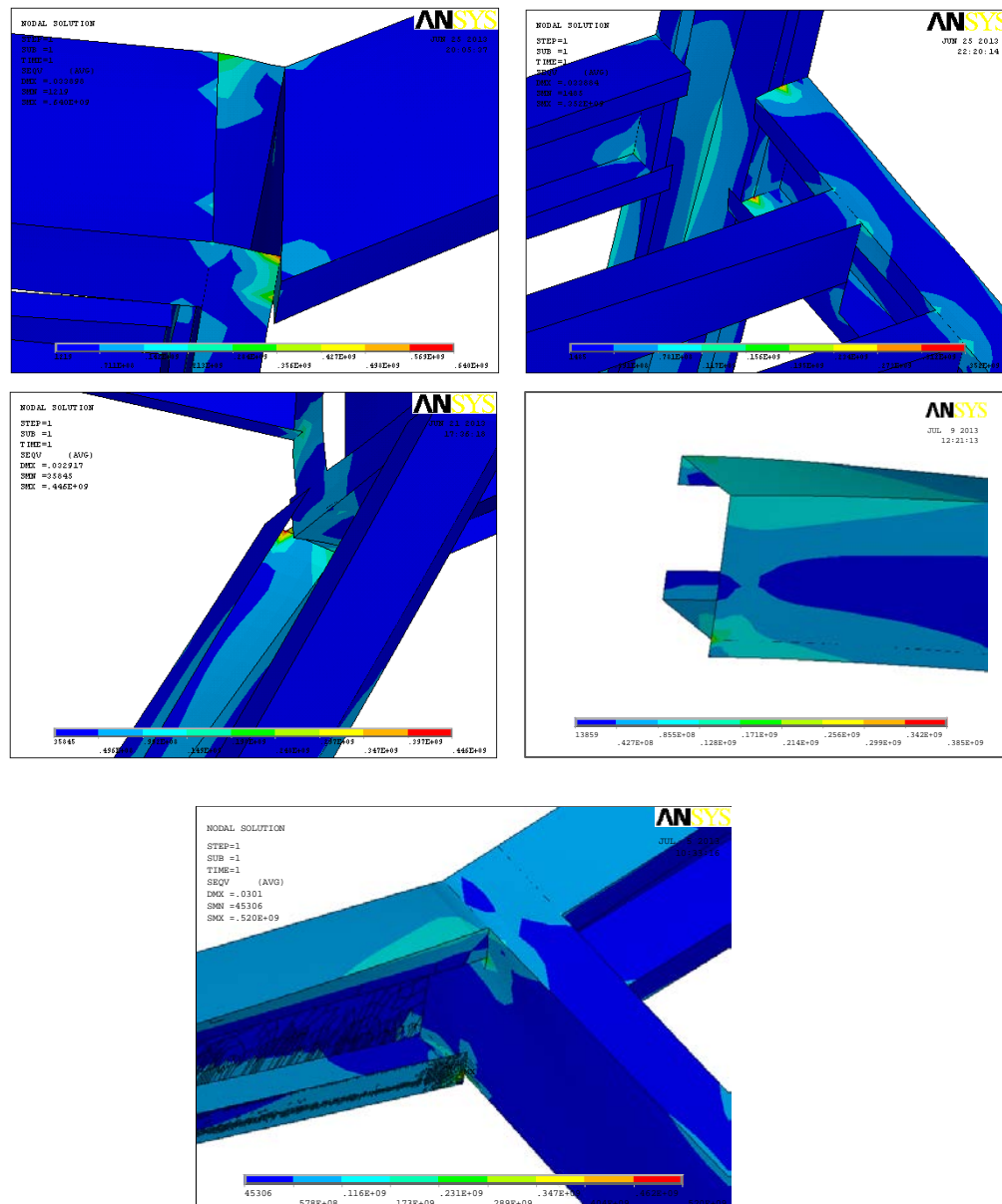


Figura 32: Picos de tensión por encima de normativa

Estas situaciones constituyen un fallo en el diseño del modelo y por lo tanto deben ser subsanadas para poder cumplir la normativa de seguridad vigente. Para ello se sugieren las siguientes soluciones que permiten que la estructura no plastifique y por lo tanto se encuentre entre los límites de la seguridad.



## 9.1 Solución a problema tensional I

En este caso la solución es bastante sencilla y consiste en soldar una placa del mismo material y espesor que la viga DEM-018 y que cubra todo su perfil. Esta placa aumenta la rigidez del sistema y permite que los picos de tensión alcanzados se encuentren dentro de lo que exige la normativa vigente.

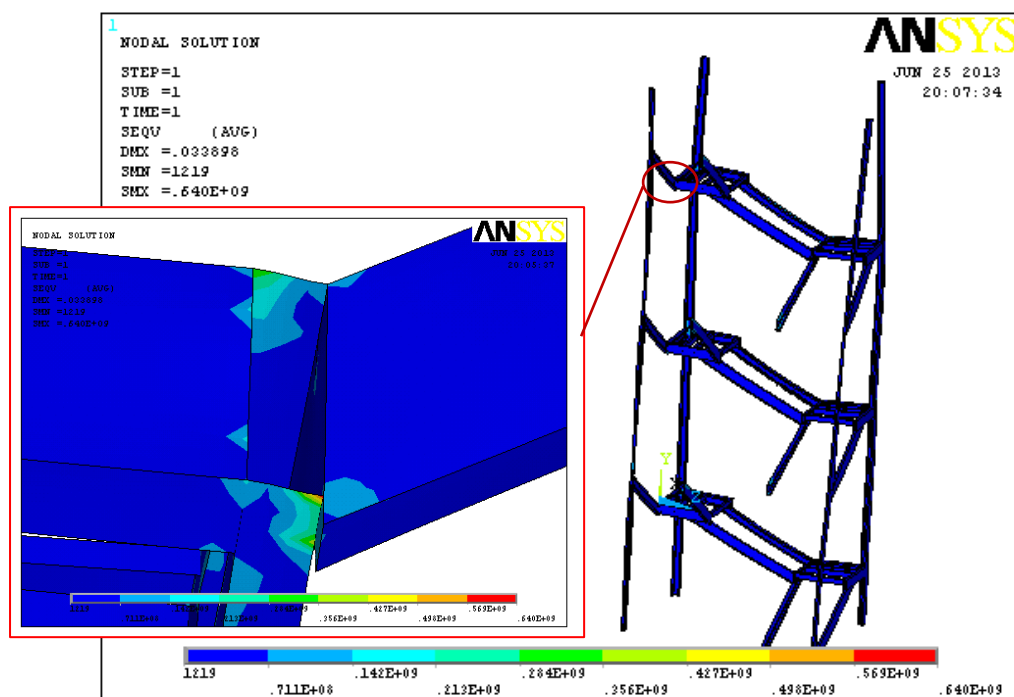


Figura 33: Extremo de DEM-018 antes de solución a problema tensional I

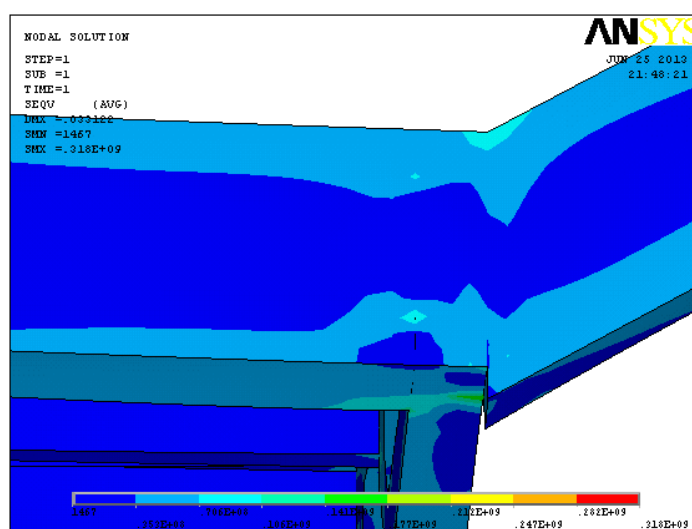


Figura 34: Extremo de DEM-018 después de solución a problema tensional I

Además se pueden obtener los materiales de los excedentes de material que se den al realizar cortes en las vigas para su acople al diseño específico del momento por lo que permite aprovechar mejor la materia prima utilizada en su construcción.

## 9.2 Solución a problema tensional II

En este caso el problema se soluciona mejorando el nivel de aproximación a la realidad con que se construye la placa de unión entre el rellano y el pilar dado que en el modelo inicial sí se tiene una placa que además de realizar esa unión permite un aumento de la rigidez de la misma. La solución adaptada es la creación de dicha placa de unión que se suelda a la viga del rellano y a su vez se atornilla al pilar. Como en muchas otras ocasiones se va a modelar en principio la unión como si estuviesen soldadas ambas piezas a la placa de unión y de encontrar otros problemas se pasará a modelarla de una forma aún más aproximada a la realidad. En la figura 35 se pueden apreciar los efectos de esta solución.

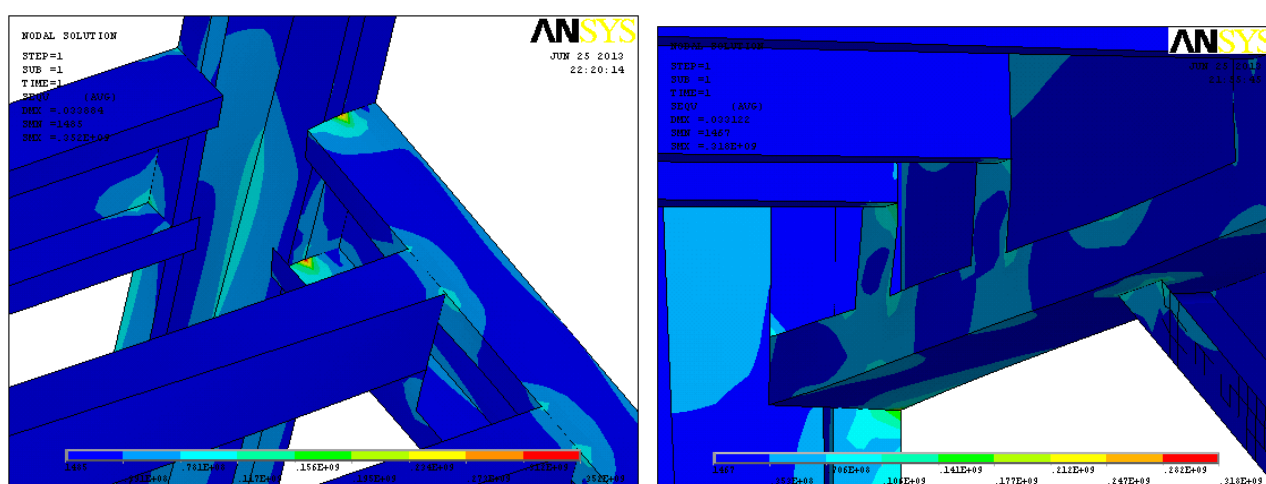


Figura 35: Antes y después de solución a problema tensional II

Como resultado a esta actuación el pico de tensión en esta zona disminuye hasta valores aprobados por la normativa.

### 9.3 Solución a problema tensional III

Este caso está dotado de una complejidad mayor al anterior y por lo tanto se han intentado diferentes soluciones tanto estructurales como de mejora del diseño de virtualización. Es por ello que a continuación se enumeran las acciones estudiadas para la disminución de las tensiones propias del diseño:

#### 1) Variación del modelado de la unión

A la vista de los resultados obtenidos y de su distancia con el objetivo a cumplir se decide estudiar un cambio en el modelado de esta unión para realizarla de una forma que se asemeje aún más a la realidad. Es por ello que en vez de modelizar esta unión mediante soldaduras como en el resto del proyecto, se va a proceder a seguir el procedimiento del diseño real: soldar la placa de unión a la viga inclinada y a su vez la placa se va a atornillar a la viga del rellano.

Para ello de nuevo es necesaria una revisión íntegra del código de programación, bastante más compleja que la anterior dado que los puntos de esta área en concreto se utilizan en una gran variedad de operaciones, y la creación de nuevas funciones.

La dificultad consiste básicamente en la creación de dos nodos exactamente en la misma posición pero cuyos atributos sean propios de dos elementos distintos, la placa de unión y la viga del rellano. Para ello el esquema a seguir es el siguiente:

- i. A la vez que se realiza la creación del modelo se corta la viga del rellano en cuestión de forma que contenga sendos nodos en los puntos en los que se quiere modelar el atornillado.
- ii. Una vez creado todo el modelo y antes de añadir las constantes propias de los materiales se crea el área de la placa de unión, se modeliza su soldadura con la viga inclinada y se corta de forma que se creen nodos nuevos en las mismas posiciones que los anteriores.
- iii. A continuación y sin hacer ningún tipo de fusión entre elementos, lo cual daría lugar a una soldadura, se atribuyen las propiedades de material a todo el modelo.
- iv. Una vez hecho esto, se continúa normalmente con el mallado y la aplicación de cargas al modelo.
- v. Para terminar, se crea una restricción de movimiento entre el nodo de una viga con el de la contigua mediante el comando COUPLINGS de forma que se crea la relación propia de un tornillo con sus elementos a unir.

## 2) Cambio en el espesor de la placa de unión

Variables con cambios	Valor
Espesor de la placa de unión	4,5 mm

Tabla 7: Variables de Variación 2

Con este cambio se intenta darle una mayor rigidez al conjunto de la unión. Este cambio se realiza mediante un cambio de variables en la definición de las constantes reales del material, lo cual proporciona los siguientes resultados:

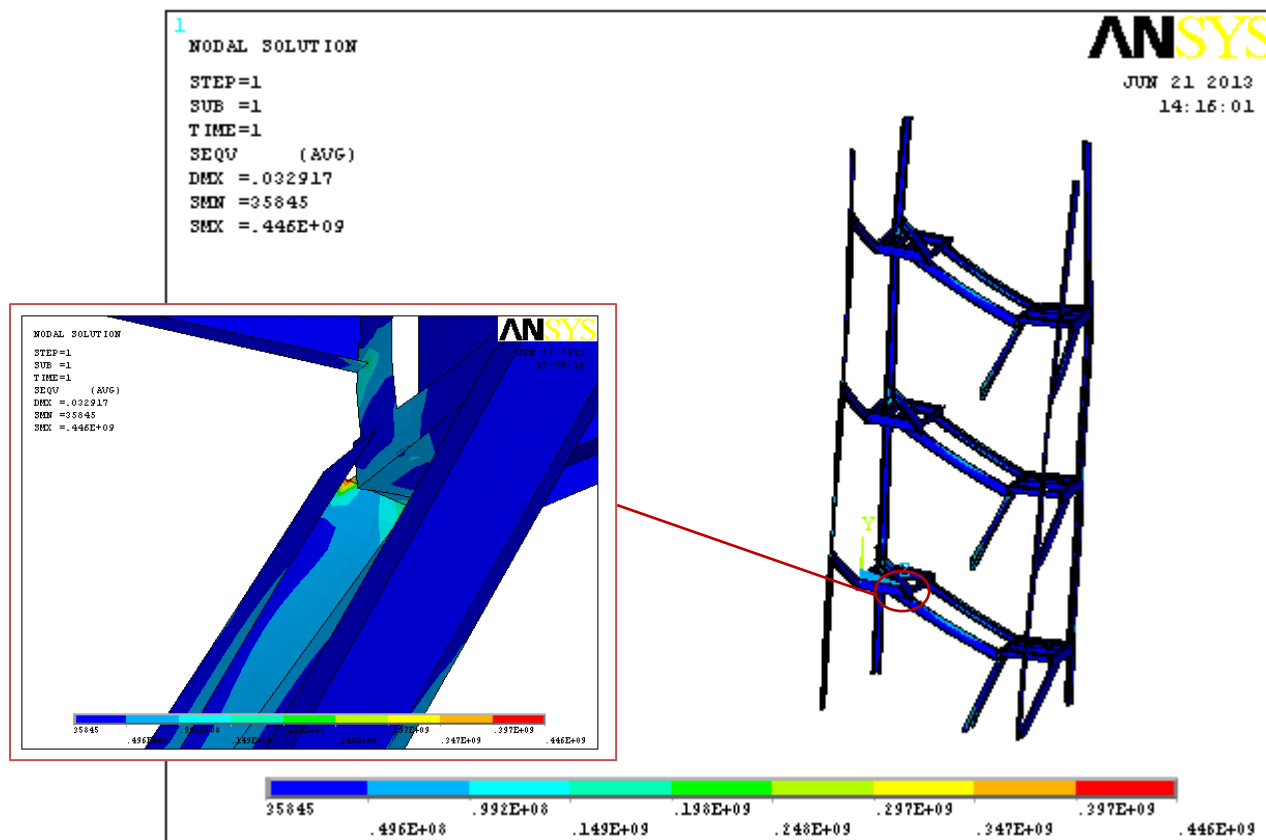


Figura 36: Estado tensional de Variación 1

Como se puede observar los resultados aún no son admisibles por la normativa vigente.

### 3) Cambio en el tamaño de la placa de unión

Variables con cambios	Valor
<b>Espesor de la placa de unión</b>	4,5 mm
<b>Tamaño de placa de unión</b>	Abarca todo el perfil de DEM-007

Tabla 8: Variables de Variación 2

En esta ocasión se propone el cambio de la placa de unión entre rellano y viga inclinada por una que cubra todo el ancho del perfil de la viga inclinada. Este proceso conlleva una revisión íntegra del código de programación y una reestructuración de algunas de sus funciones. Con este cambio estructural se puede observar que no se obtiene una mejora sustancial en los valores de tensión dado que sigue estando muy por encima de los límites establecidos por la normativa de seguridad vigente.

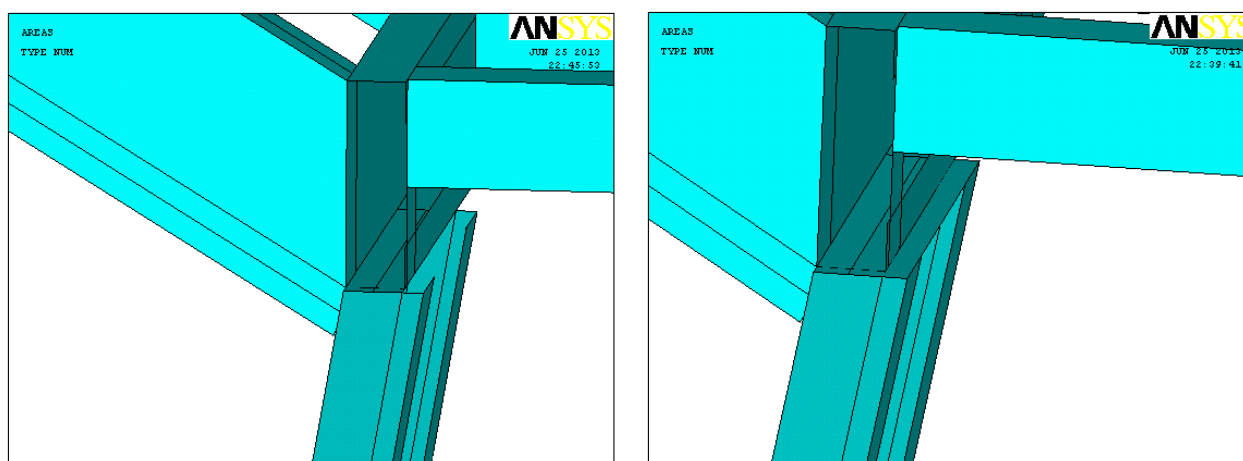


Figura 37: Antes y después de alternativa propuesta

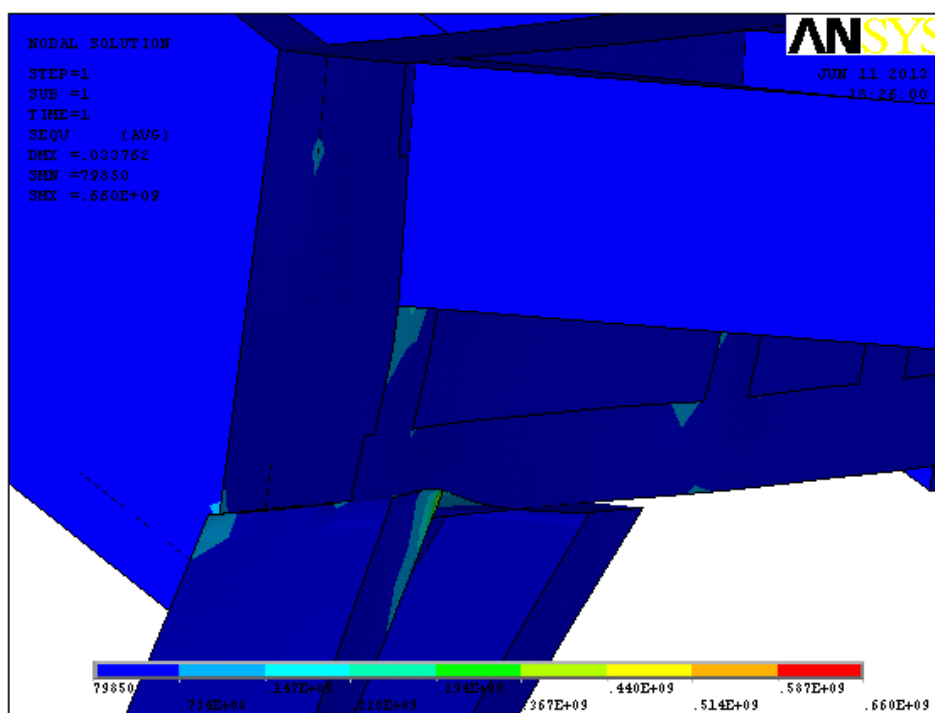


Figura 38: Estado tensional de Variación 3

4) Cambio en el espesor de la viga inclinada DEM-007

Variables con cambios	Valor
Espesor de la placa de unión	4,5 mm
Tamaño de placa de unión	Abarca todo el perfil de DEM-007
Espesor viga DEM-007	4,5 mm

Tabla 9: Variables de Variación 3

Teniendo en cuenta que los puntos en los que se alcanza el mayor valor tensional suelen darse en esta viga la solución propuesta es aumentar el espesor de la misma. Como incremento inicial se ha tomado un valor de 1,5 mm, siendo el valor del espesor en total de 4,5 mm. Los resultados arrojan un valor máximo de tensión de 695 MPa lo cual está muy por encima del objetivo a lograr.

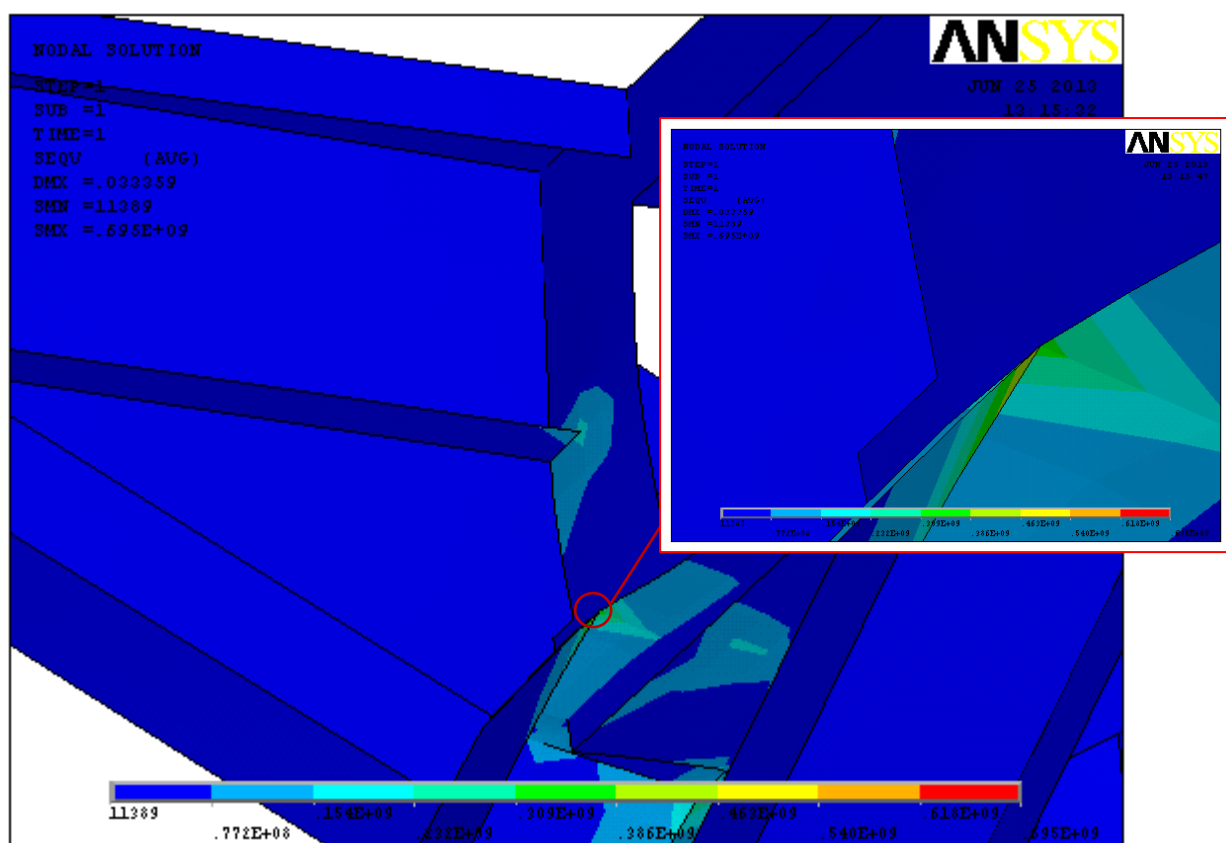


Figura 39: Estado tensional de Variación 4

5) Cambio en el espesor de la viga inclinada DEM-007

Variables con cambios	Valor
<b>Espesor de la placa de unión</b>	4,5 mm
<b>Tamaño de placa de unión</b>	Abarca todo el perfil de DEM-007
<b>Espesor viga DEM-007</b>	6 mm

Tabla 10: Variables de Variación 4

Para hacer una prueba del aumento de espesor de la viga inclinada necesario para que este tipo de solución sea definitiva se realiza un nuevo incremento de espesor en ella. Los resultados arrojan un valor tensional máximo de 586 Mpa, lo cual además de estar muy por encima de los límites de la seguridad indica que sería necesario un gran aumento de espesor de la viga para llegar a esos límites por lo que esta solución conlleva un aumento de material y por tanto de costes que la hacen inviable.

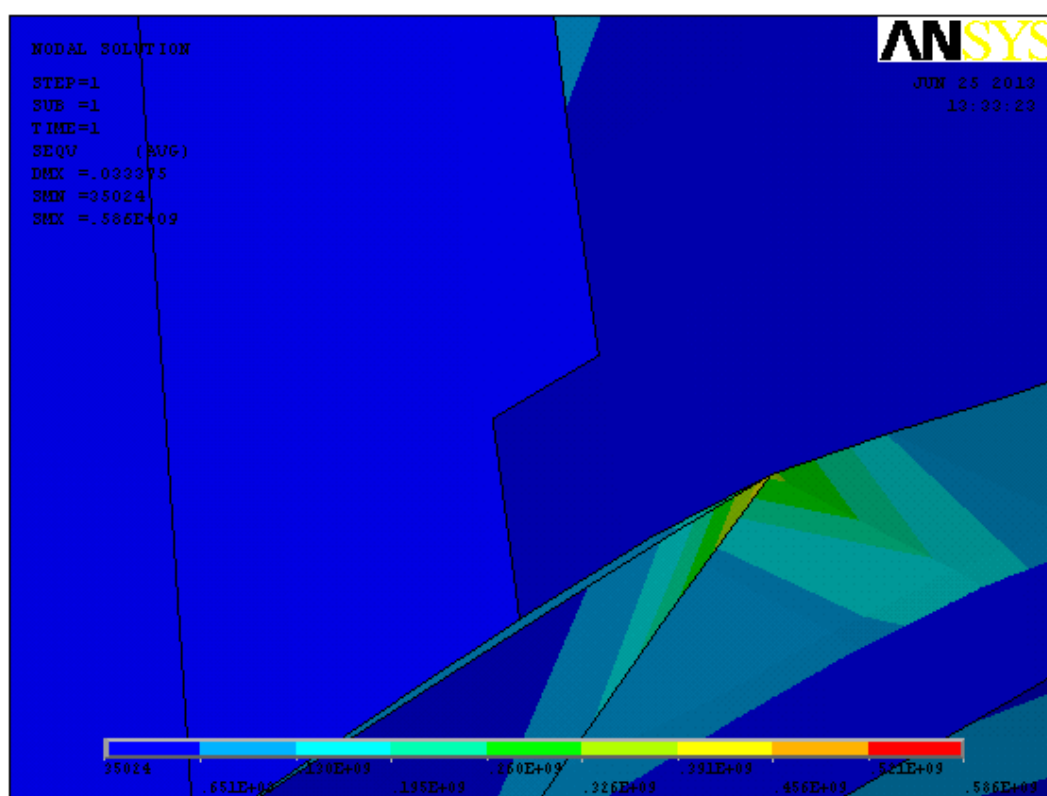


Figura 40: Estado tensional de Variación 5

6) Vuelta a la placa de unión anterior y aumento de espesores en placa y viga

Variables con cambios	Valor
<b>Espesor de la placa de unión</b>	4,5 mm
<b>Tamaño de placa de unión</b>	Diseño inicial
<b>Espesor viga DEM-007</b>	4,5 mm

Tabla 11: Variables de Variación 6

Dado que con la placa de menor tamaño se obtuvieron valores tensionales más propicios es lógica la vuelta a este diseño inicial. Para su mejora se ofrece como alternativa el aumento de los espesores tanto de la placa de unión como de la viga inclinada DEM-007, obteniendo los siguientes resultados:

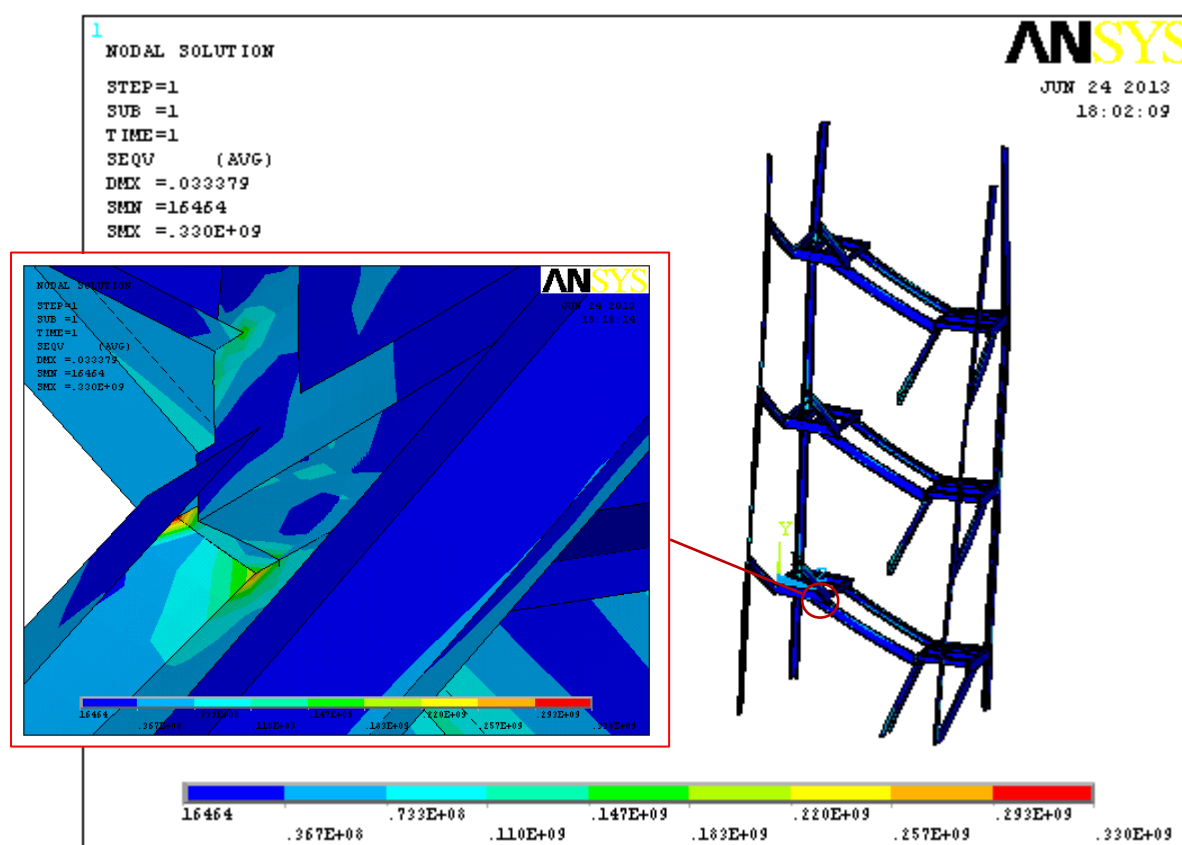


Figura 41: Estado tensional de Variación 6

Se puede observar que el valor máximo de tensión alcanzado es de 330 MPa por lo que aún no se ha alcanzado el objetivo.



7) Aumento del espesor de la placa de unión

Variables con cambios	Valor
<b>Espesor de la placa de unión</b>	6 mm
<b>Tamaño de placa de unión</b>	Diseño inicial
<b>Espesor viga DEM-007</b>	4,5 mm

Tabla 12: Variables de Variación 7

Una de las opciones a plantear es volver a aumentar el espesor de la placa de unión. Si se tiene en cuenta que para otra partes del modelo se utilizan placas de 3 mm de espesor se puede utilizar dos placas de este tipo de forma que se alcancen los 6 mm de espesor sin tener que incurrir en la creación de una pieza específica para esta parte de la estructura con los costes adicionales que ello supone. Al realizar esta simulación se observan los siguientes resultados:

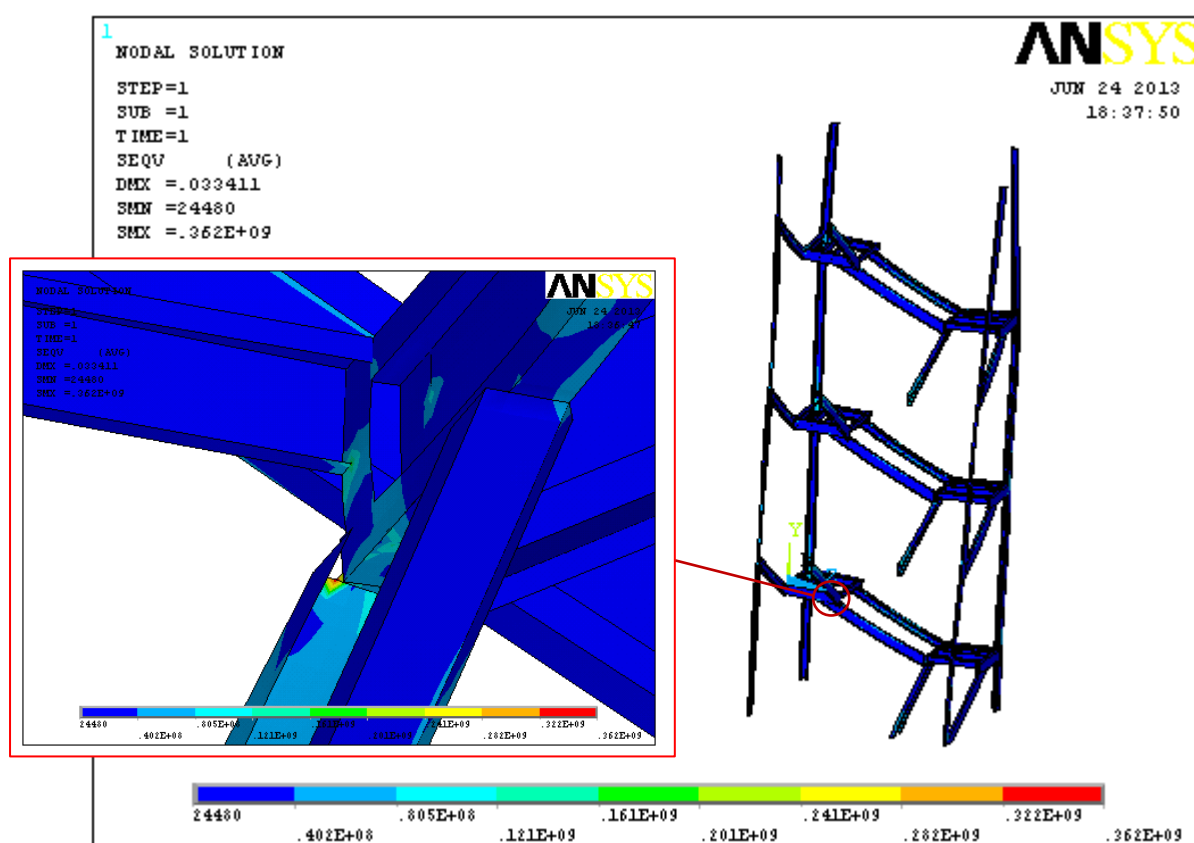


Figura 42: Estado tensional de Variación 7

De nuevo se obtiene un valor tensional de valor 362 MPa que no cumple la normativa y además se aleja del objetivo por lo que parece lógico dejar el espesor de la placa de unión fijo en 3 mm tal y como estaba en el diseño inicial.

8) Aumento de espesor de viga inclinada DEM-007

Variables con cambios	Valor
Espesor de la placa de unión	3 mm
Tamaño de placa de unión	Diseño inicial
Espesor viga DEM-007	5 mm

Tabla 13: Variables de Variación 8

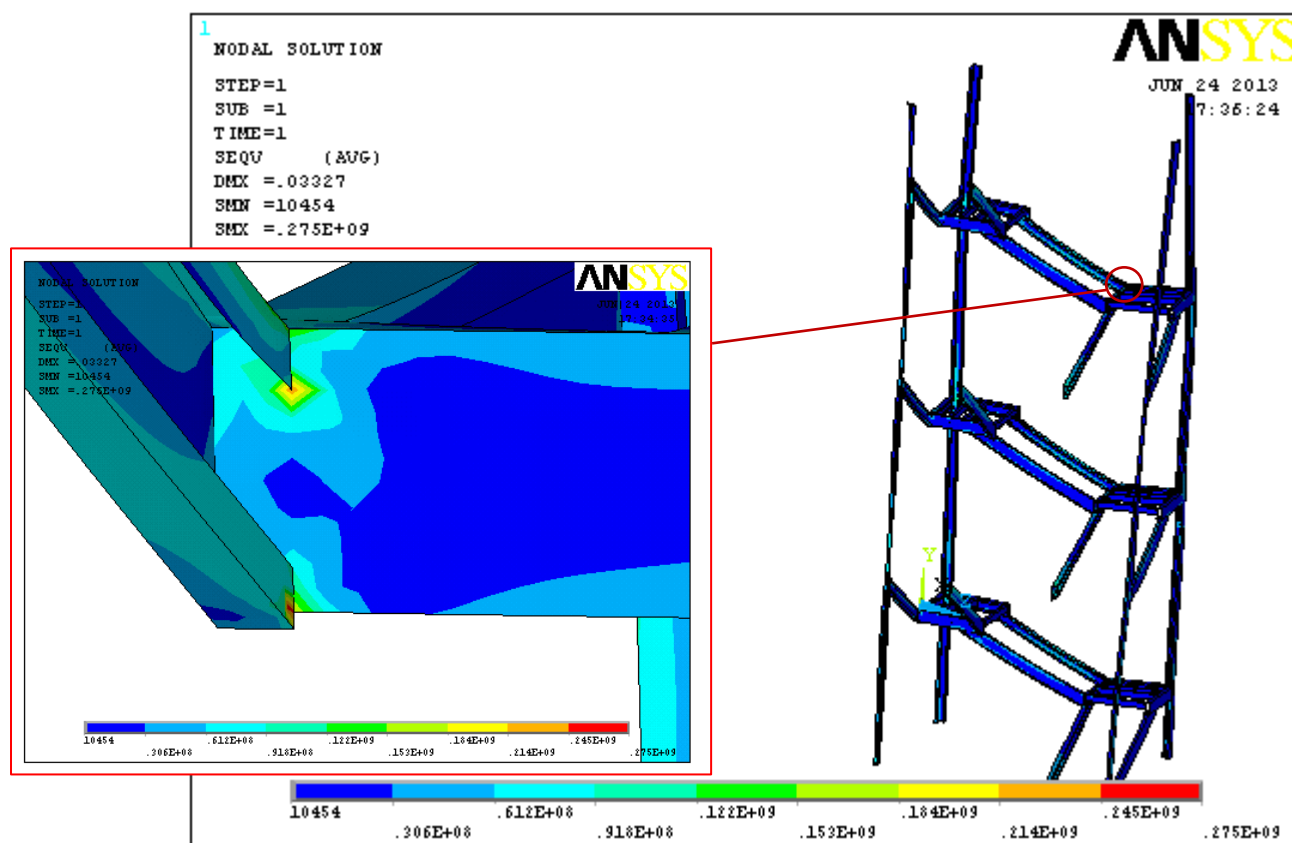


Figura 43: Estado tensional de Variación 8

Vemos que en este caso el problema tensional se traslada a otra zona de la estructura con valores por encima de lo permitido. Debido a ello se intenta reforzar en el próximo punto esa zona con un aumento de espesor.

9) Aumento de espesor de DEM-004

Variables con cambios	Valor
Espesor de la placa de unión	3 mm
Tamaño de placa de unión	Diseño inicial
Espesor viga DEM-007	5 mm
Espesor viga DEM-004	4 mm

Tabla 14: Variables de Variación 9

Debido a los resultados anteriores la variación propuesta es el aumento del espesor de la viga inclinada DEM-004 de forma que sea capaz de aguantar los esfuerzos a los que se le somete.

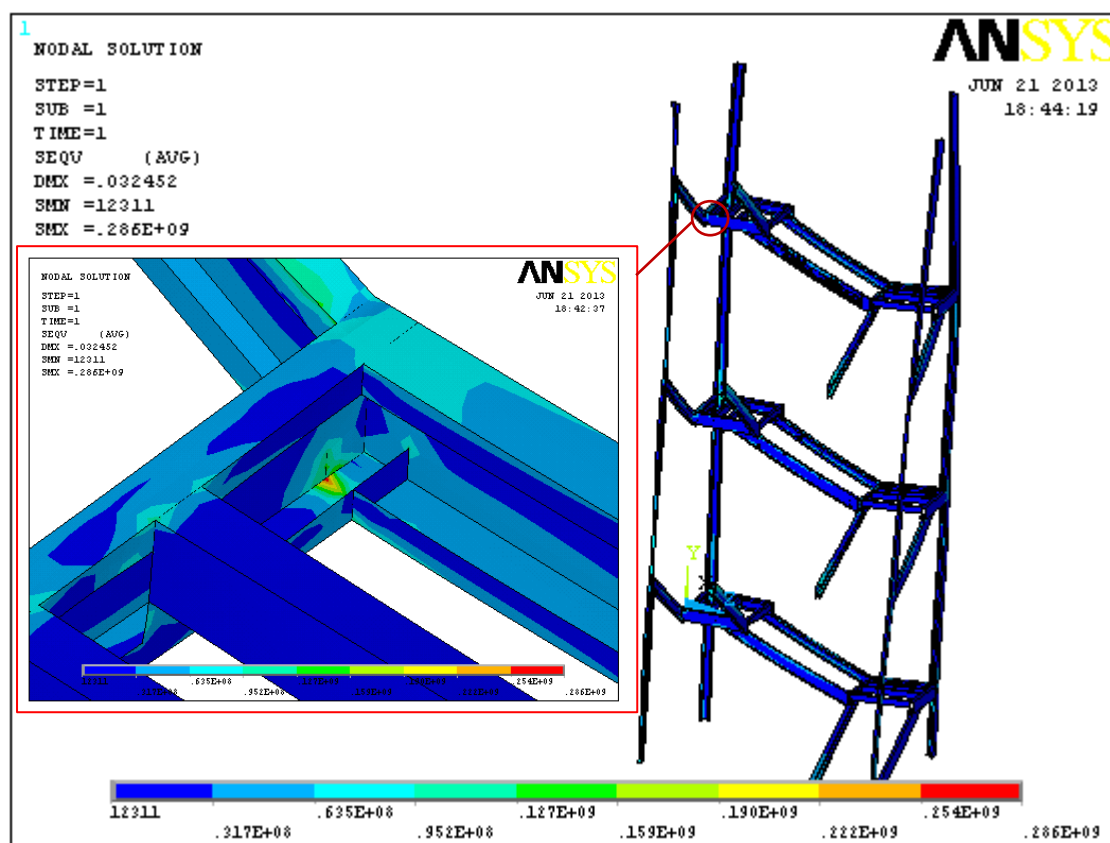


Figura 44: Estado tensional de Variación 9

Como se puede observar esta vez se alcanza un pico de tensión de 286 MPa que sobrepasa los valores máximos en el interior de una de las vigas del rellano por lo tanto sigue sin ser admisible el comportamiento de la estructura.

10) Aumento de espesor de DEM-018

Variables con cambios	Valor
Espesor de la placa de unión	3 mm
Tamaño de placa de unión	Diseño inicial
Espesor viga DEM-007	5 mm
Espesor viga DEM-004	4 mm
Espesor viga DEM-018	4 mm

Tabla 15: Variables de Variación 10

Como solución al problema anterior se propone aumentar el espesor de la viga a tratar, DEM-018. Los resultados obtenidos son los siguientes:

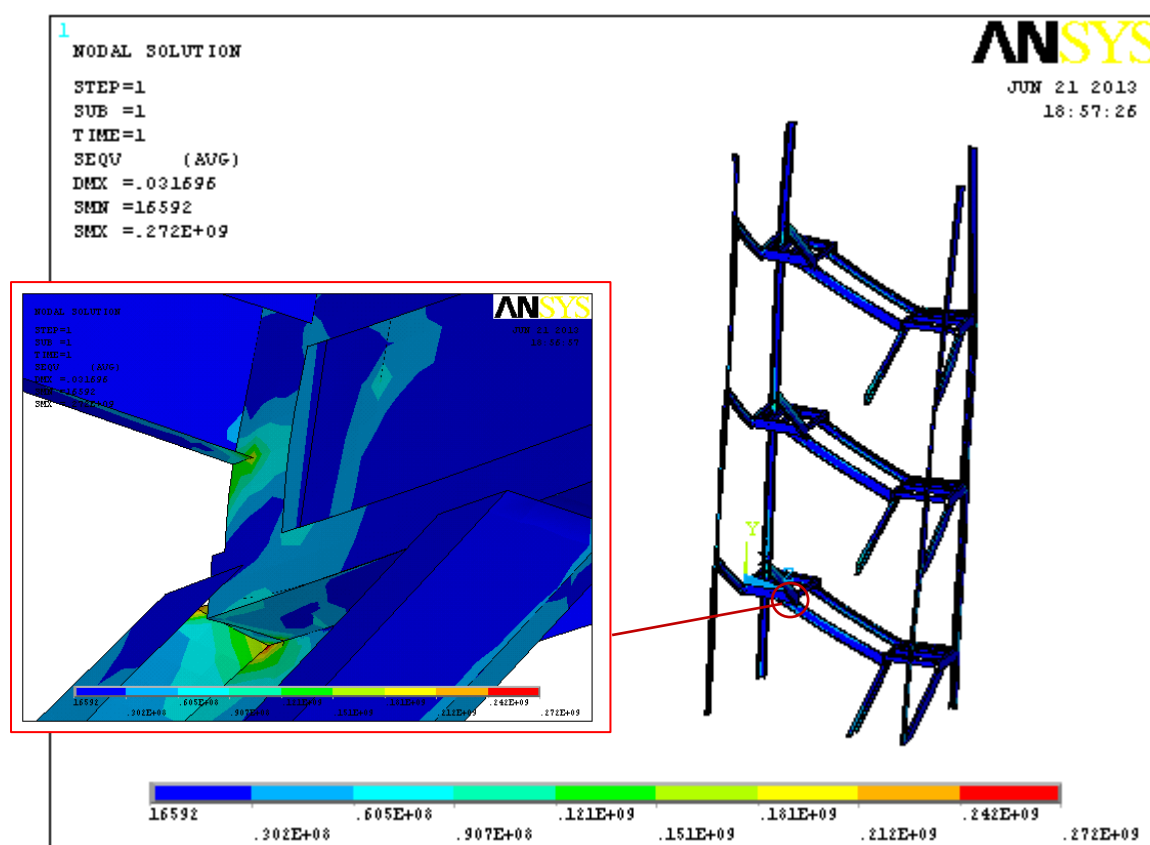


Figura 45: Estado tensional de Variación 10

Se observa que se vuelve a alcanzar el pico de tensión inicial en la viga inclinada DEM-007 por lo que se necesita una nueva solución al mismo.

11) Aumento de espesor de DEM-007

Variables con cambios	Valor
Espesor de la placa de unión	3 mm
Tamaño de placa de unión	Diseño inicial
Espesor viga DEM-007	6 mm
Espesor viga DEM-004	4 mm
Espesor viga DEM-018	4 mm

Tabla 16: Variables de Variación 11

Con este aumento de espesor que ya alcanza el doble del espesor inicial para este elemento estructural se obtienen los siguientes resultados:

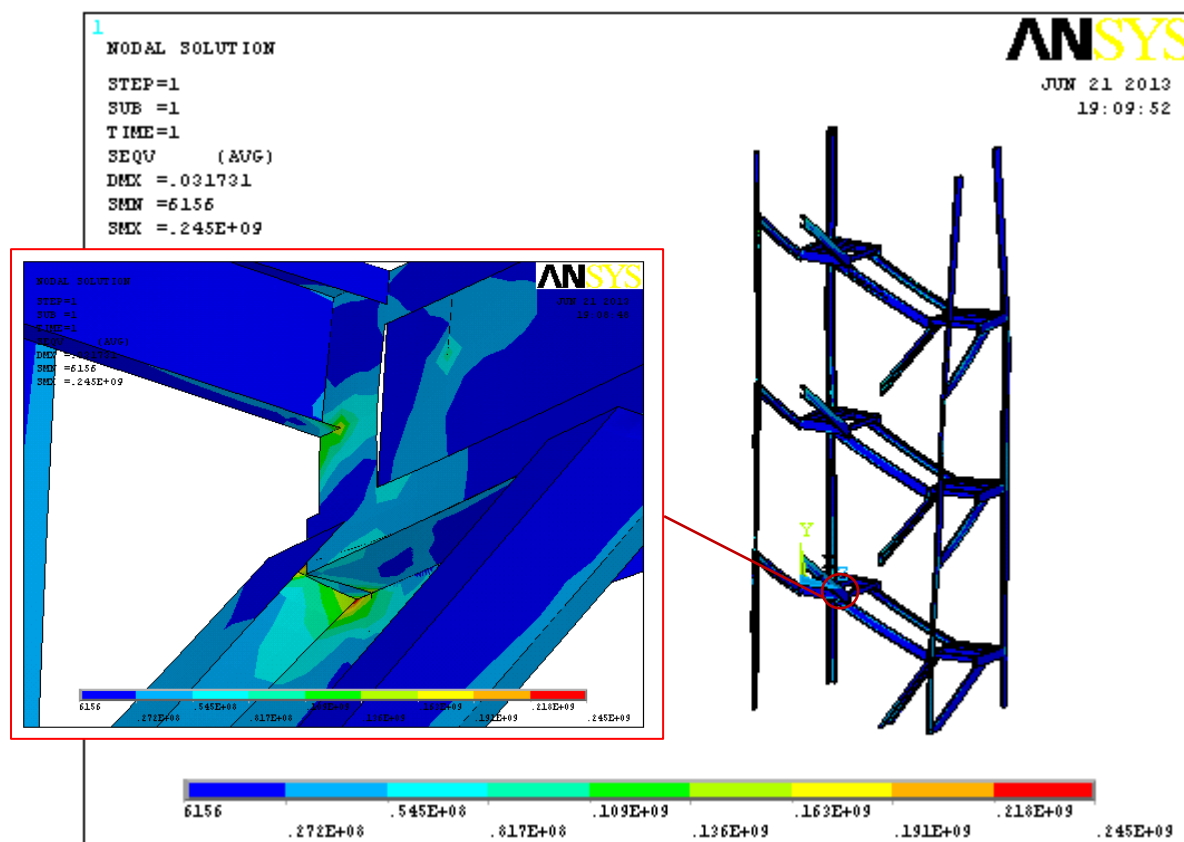


Figura 46: Estado tensional de Variación 11 (I)

Como se puede observar los valores tensionales máximos que soporta la estructura se alcanzan en el punto problemático inicial pero alcanzan valores por debajo del valor máximo admitido por normativa (Unos 261 MPa como se ha calculado anteriormente). Por lo tanto se habría alcanzado una solución suficientemente segura como para permitir la construcción de esta estructura. A modo de comprobación se disminuye el tamaño de mallado en las zonas de estudio de forma que se pueda ver de forma más precisa el gradiente de tensiones. Lamentablemente el resultado de este ejercicio arroja un pico de tensión de 311 MPa con un mallado de tamaño de malla de 15 mm por lo que serán necesarias otras soluciones estructurales.

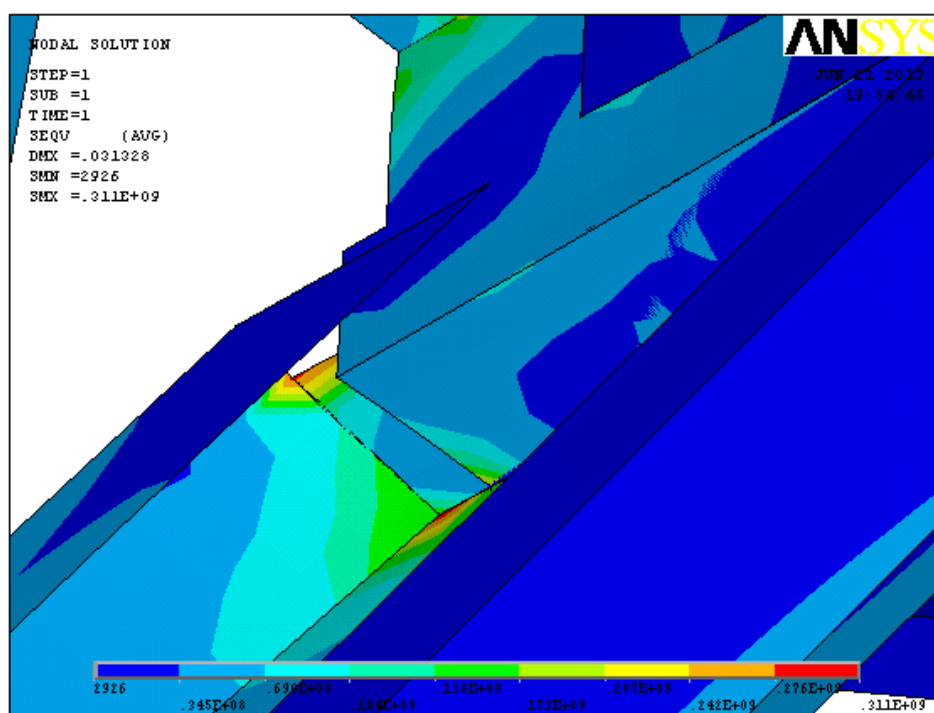


Figura 47: Estado tensional de Variación 11 (II)

12) Aumento de espesor de DEM-007

Variables con cambios	Valor
Espesor de la placa de unión	3 mm
Tamaño de placa de unión	Diseño inicial
Espesor viga DEM-007	8 mm
Espesor viga DEM-004	4 mm
Espesor viga DEM-018	4 mm

Tabla 17: Variables de Variación 12

Para adquirir un mejor grado de análisis se procede a dejar el tamaño de malla fijo en 15 mm. A raíz del resultado anterior se vuelve a aumentar el espesor de la viga DEM-007 sin resultado satisfactorio puesto que se encuentra un valor máximo de tensión de 298 MPa por lo que aún no es válida la estructura según normativa vigente.

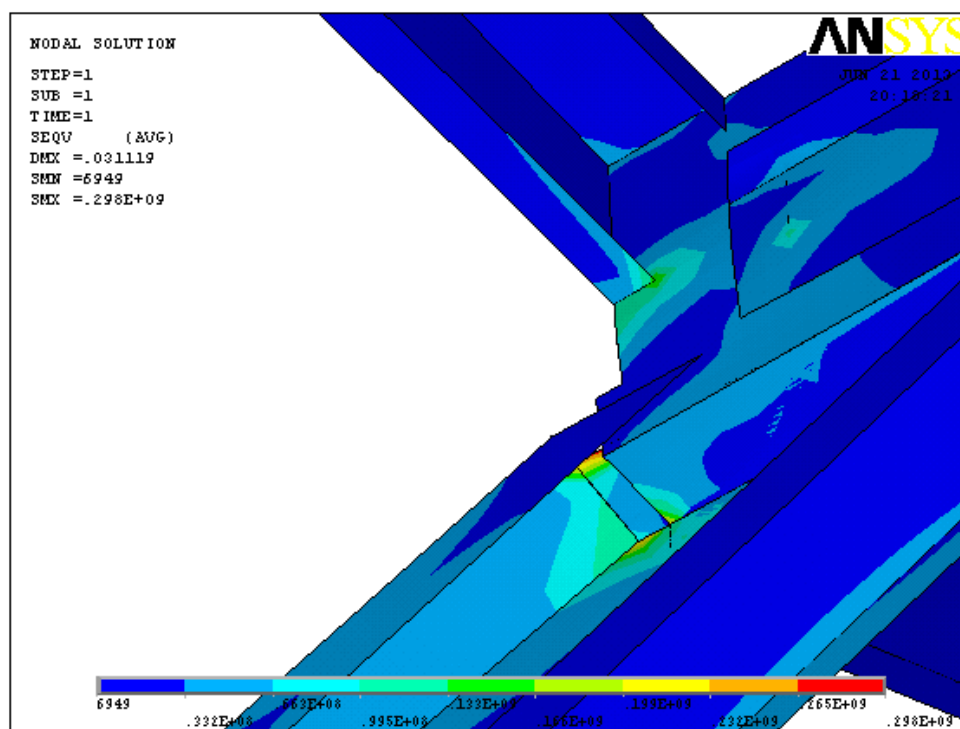


Figura 48: Estado tensional de Variación 12

13) Aumento de espesor de DEM-007

Variables con cambios	Valor
Espesor de la placa de unión	3 mm
Tamaño de placa de unión	Diseño inicial
Espesor viga DEM-007	10 mm
Espesor viga DEM-004	4 mm
Espesor viga DEM-018	4 mm

Tabla 18: Variables de Variación 13

Con estas variables se alcanza un valor bastante mayor de 266 MPa en el punto a estudiar de la viga DEM-007, por lo tanto el punto de máxima tensión que se da en la estructura sigue superando los límites establecidos por la normativa y se debería seguir buscando una solución al problema.

Llegados a este punto y debido a la rareza de los resultados obtenidos con espesores de valor igual a 1 cm, siendo éste un espesor raramente utilizado debido a la gran resistencia que aporta, empieza a ser posible que este punto contenga una singularidad tensional y debido a ello se obtengan resultados tan atípicos en la región que lo rodea. Una singularidad tensional consiste en la aplicación de cargas en un punto o línea matemático que produce que, al ser nula el área en la que se aplica esa carga, la tensión tienda al infinito en esa región y por lo tanto el programa la represente con una tensión excepcionalmente alta. Como comprobación se va a realizar un análisis con un mallado de tamaño significativamente pequeño y se podrá concluir que se está ante una singularidad tensional si el valor de tensión aumenta de una forma considerable. El tamaño de mallado a considerar es de 2 mm en la zona problemática y los resultados obtenidos se pueden apreciar en la Figura 49. Las variables utilizadas en dicho análisis corresponden al diseño original exceptuando un espesor de 4 mm en la viga inclinada a estudiar (DEM-007).

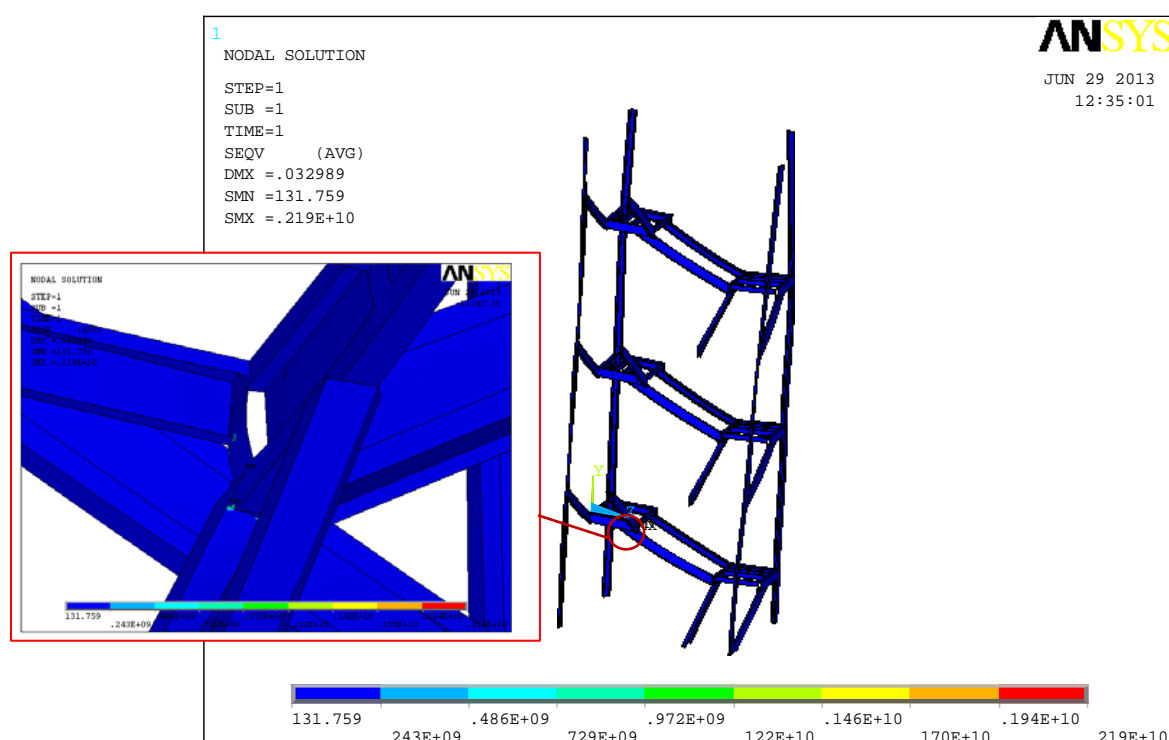


Figura 49: Estado tensional de singularidad tensional



Se concluye que DEM-007 contiene una singularidad tensional en sus uniones a DEM-018 basándose en los siguientes factores:

- A medida que se disminuye el tamaño de mallado se obtienen valores cada vez más altos y de valores excepcionalmente inusuales en estructuras reales como los 2190 MPa obtenidos en el experimento realizado como se puede ver en la Figura 49.
- El citado punto de DEM-007 constituye un punto perfectamente capaz de desarrollar una singularidad de este tipo debido a que la totalidad de la carga recae en dicha región.

Debido a esta singularidad tensional hallada se puede dar por solucionado el Problema tensional III y proseguir con el desarrollo de elección del mejor diseño a implantar.

## 9.4 Solución a problema tensional IV

Como se puede observar también se alcanzan tensiones no permitidas por la normativa en los anclajes de la estructura al forjado, concretamente en las sujeciones de la viga inclinada DEM-001 como se aprecia en la Figura 50:

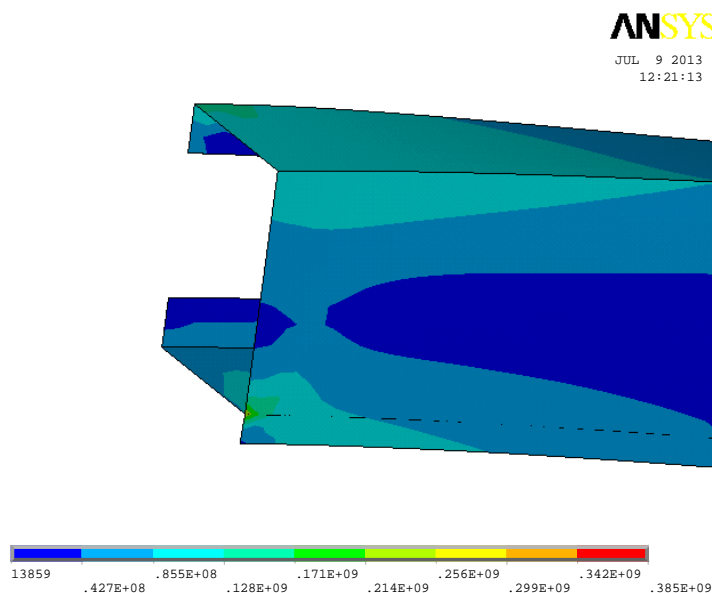


Figura 50: Estado tensional anclaje viga DEM-001

Debido a esta irregularidad se procede a realizar las modificaciones típicas del modelo inicial para su subsanación, como pueden ser su aumento de espesor o una variación en la virtualización del modelo de anclaje. Después de realizar esta última, consistiendo en la creación de la placa de unión y su posterior fijación mediante taladrado como se puede ver en la Figura 51 se puede concluir que este tipo de unión constituye una singularidad tensional como se puede apreciar en la Figura 52 por los altos valores de tensión que se observan en los puntos de unión al forjado:

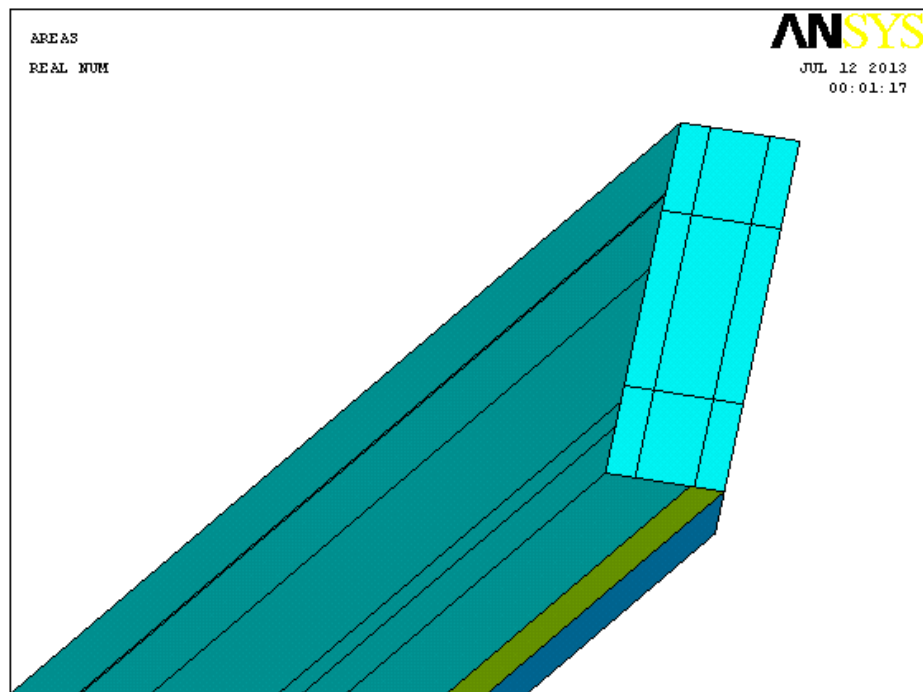


Figura 51: Cambio en el modelo de anclaje

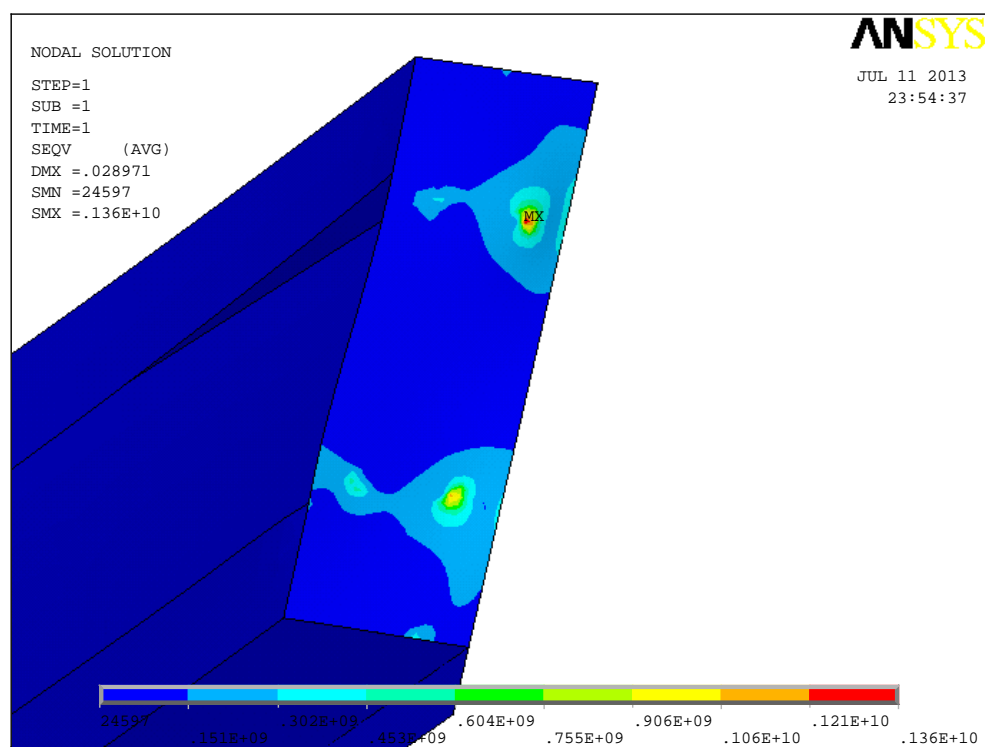


Figura 52: Estado tensional con cambio de anclaje

Por lo tanto estos puntos deberán ser excluidos del estudio dado que las tensiones representadas por el programa son fruto de una mala interpretación por parte de ANSYS.

## 9.5 Solución a problema tensional V

Para su estudio se procede a analizar la zona con un tamaño de mallado de 3 mm en toda la zona afectada. Como se puede observar en las imágenes en este caso se tiene otra singularidad tensional dado que a medida que se disminuye el tamaño de mallado se encuentran unos aumentos astronómicos en el valor tensional obtenido (Siendo este inicialmente del orden de 320 MPa). Es por ello que este punto deberá ser excluido del estudio de la misma manera que los anteriores.

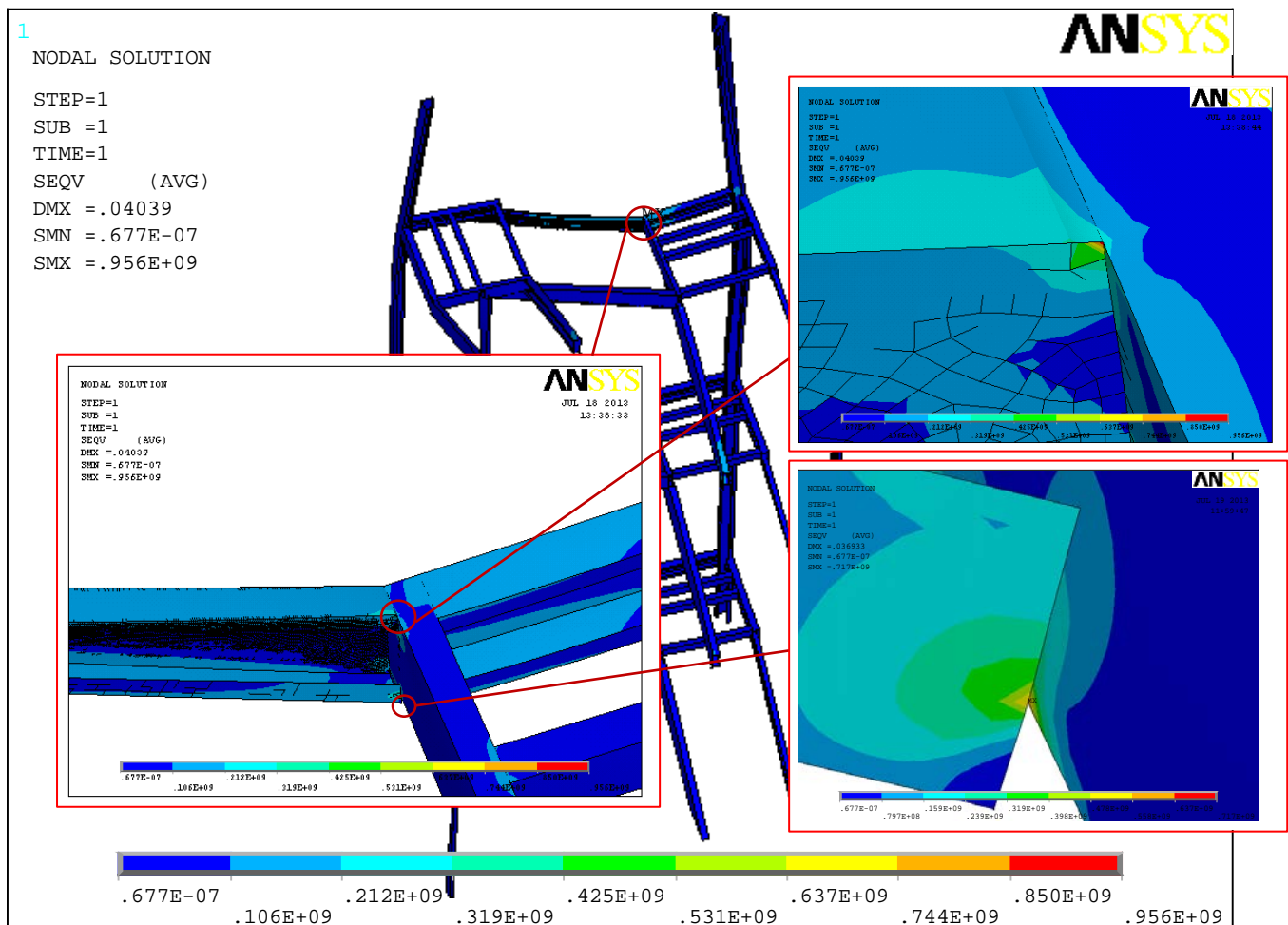


Figura 53: Estado tensional de singularidad tensional

## 9.6 Verificaciones finales

Una vez eliminados los nodos en los que se producen estas singularidades tensionales se procede a realizar un análisis sobre un modelo basado en el original, es decir, con todas sus piezas de espesor con valor igual a 3 mm. Se obtiene del mismo que las uniones de una de las vigas del rellano (DEM-021) con el pilar se alcanzan valores de 329 MPa como se puede ver en la tabla e imagen siguientes por lo que se procede a hacer un nuevo análisis con un espesor de 4 mm en esta zona.

### MAXIMUM VALUES

	S1	S2	S3	SINT	SEQV
NODE	115100	106327	38456	115100	38853
VALUE	0.35435E+09	0.24993E+09	0.94530E+07	0.35435E+09	0.32295E+09

Tabla 19: Resultados de ANSYS verificaciones finales

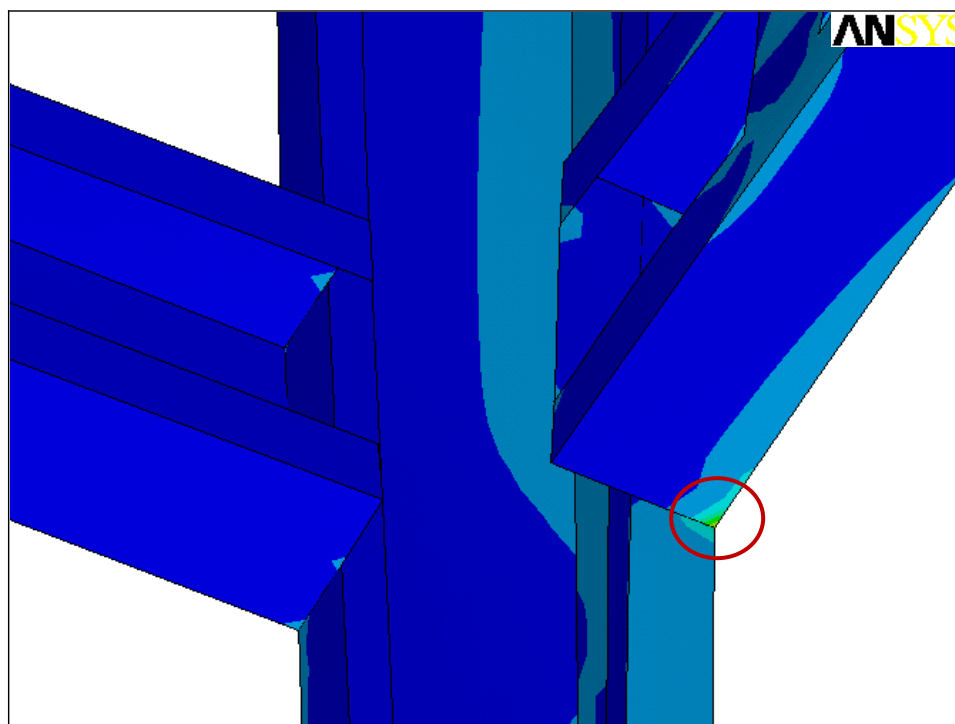


Figura 54: Estado tensional de verficiaciones finales I

En este nuevo análisis se repite el proceso anterior, es decir, se obvian los puntos que constituyen una singularidad tensional y se analizan los valores máximos de tensión equivalente que aparecen en el modelo. Con la configuración ya citada se obtienen los siguientes valores de tensiones máximas representadas en la Tabla 20 :

MAXIMUM VALUES					
NODE	43675	31263	6371	70214	43688
VALUE	0. 25509E+09	0. 21509E+09	0. 78354E+07	0. 27283E+09	0. 26105E+09

Tabla 20: Tensiones máximas en estructura

Se puede observar que se alcanzan los 261,05 MPa en el nodo 43688 situado exactamente en la junta a estudiar. Aunque este valor de tensión cumple la normativa vigente (Por debajo de 261,09 MPa) es necesario realizar el mismo análisis con un tamaño de malla menor dado que es bastante plausible que se encuentre un pequeño repunte de tensión con un valor de tamaño de mallado más pequeño. Los siguientes resultados se han obtenido con un tamaño de mallado de 5 mm y se reflejan en la Tabla 21:

MAXIMUM VALUES					
NODE	110502	98090	13782	137109	110515
VALUE	0. 25447E+09	0. 21506E+09	0. 38977E+07	0. 27289E+09	0. 26112E+09

Tabla 21: Tensiones máximas en estructura (mallado fino)

Como era de esperar se ha obtenido una tensión ligeramente superior a la de normativa. Por lo tanto y para conseguir un nivel de seguridad aceptable se propone aumentar en medio milímetro el valor de espesor de la viga del rellano de numeración DEM-021 de forma que el nivel de tensión en la zona se rebaje ostensiblemente. De esta forma en la tabla 22 se pueden ver los resultados de dicho ensayo:

MAXIMUM VALUES					
NODE	76330	11721	117604	76330	76330
VALUE	0. 26911E+09	0. 15413E+09	0. 26796E+07	0. 26911E+09	0. 25412E+09

Tabla 22: Tensiones máximas en estructura (final)

Por lo tanto se ha alcanzado un nivel de seguridad tal que no se superan en la estructura los límites impuestos por la normativa expuesta en el Código Técnico de la Edificación. De esta manera se puede dar paso a la construcción del modelo y a considerar las conclusiones finales de este Proyecto Fin de Carrera.

## 10 Conclusiones

Se concluye que los citados puntos de la estructura constituyen una singularidad tensional que el programa no es capaz de analizar e interpretar debidamente. De esta forma se procede a obviar dichos puntos del estudio y se pasa a estudiar el resto del conjunto.

Por tanto se propone un diseño en el que las variables a utilizar sean las expuestas en la Tabla 23.

Variables con cambios	Valor
Espesor de la placa de unión	3 mm
Tamaño de placa de unión	Diseño inicial
Espesor viga DEM-007	4 mm
Espesor viga DEM-004	3 mm
Espesor viga DEM-018	3 mm
Espesor vigas DEM-021	4,5 mm

Tabla 23: Variables finales del modelo

## 11 Aplicación y futuros trabajos

La aplicación directa de este proyecto es su implantación al sistema de fabricación de este tipo de escaleras tal y como ya se ha explicado anteriormente.

Además de esta aplicación, también se puede utilizar en procesos de diseño de edificios nuevos y no sólo en edificios antiguos.

Como futuros trabajos se pueden proponer los siguientes:

- Ampliación de la aplicación con un estudio de los costes en material que supone la estructura en base a las dimensiones empleadas.
- Diseño del sistema de producción de las piezas a partir de planchas de acero incluyendo el corte en prensa y el posterior plegado y corte del material.
- Mejora de la precisión del modelo mediante la mejora de la virtualización de las uniones, teniendo en cuenta la distinción entre tornillería y soldaduras.
- Representación del modelo en otro Software de Método de Elementos Finitos de forma que se corroboren las singularidades tensionales y su funcionamiento.
- Implantación del modelo en el proceso de fabricación. Trabajo en fábrica y montaje de un modelo estudiado anteriormente.
- Diseño de andamiaje y forma de montaje de la estructura.

## 12 Presupuesto

Los siguientes cálculos tienen como objetivo el cálculo aproximado de los costes de la realización de este Proyecto Fin de Carrera si este hubiera sido realizado en un ámbito comercial y no académico.

En concreto se estima que este Proyecto consta de un periodo de seis meses de trabajo realizado ocho horas de trabajo diario, lo que nos lleva a un total de 960 horas. Además al coste del técnico analista hay que añadirle los siguientes:

Concepto	Precio unitario (€)	Cantidad	Coste
<b>Equipo informático</b>	-	-	400 €
<b>Licencia comercial de un año de duración del módulo estructural de Ansys</b>	-	-	35.000 €
<b>Horas de analista Junior</b>	12,5	960	12.000 €
		<b>TOTAL</b>	<b>47.400 €</b>

Tabla 24: Costes estimados

Hay que añadir que en este caso la licencia académica de Ansys existente en la Universidad no es válida para la realización de este proyecto debido a que por su complejidad de diseño se rebasa por mucho el número máximo de nodos impuesto en esta versión. Es por ello que se necesita una versión profesional del módulo estructural y mecánico de Ansys.

Por lo tanto, tal y como se expone en la Tabla 24, el coste total estimado de este proyecto es de 47.400€ incluyendo el material utilizado, las licencias de Software y los costes de personal.

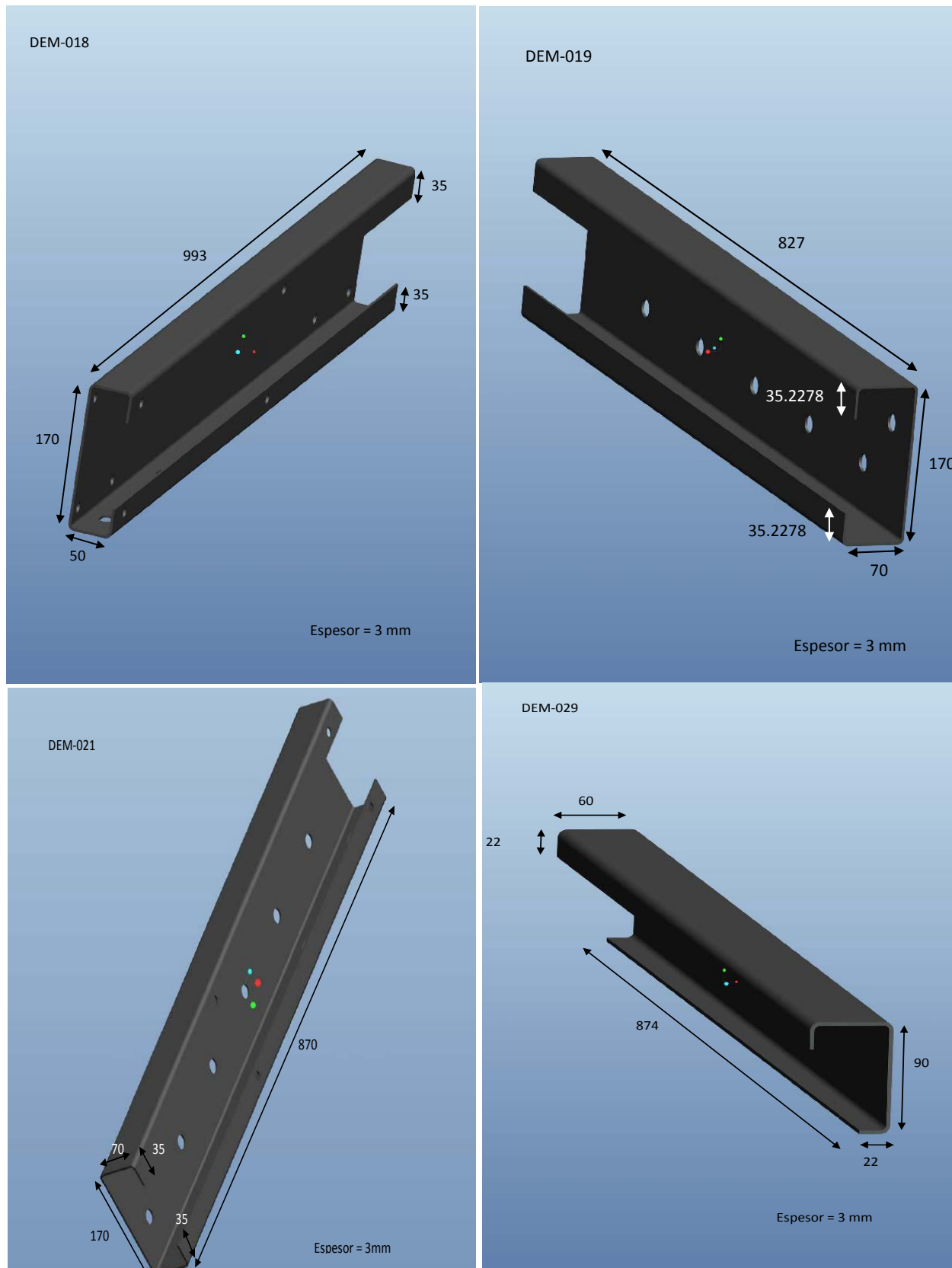


## 13 Bibliografía

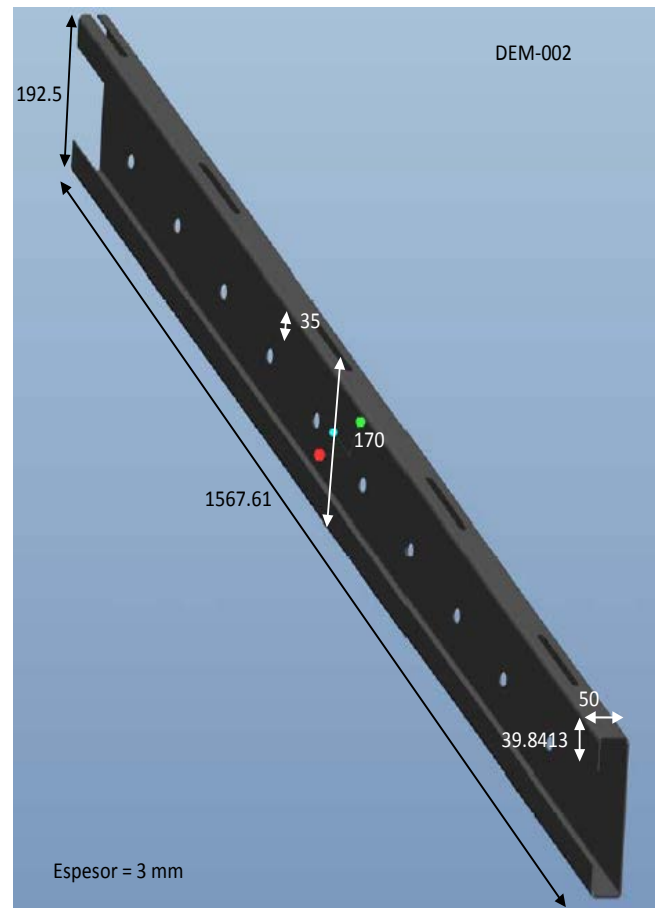
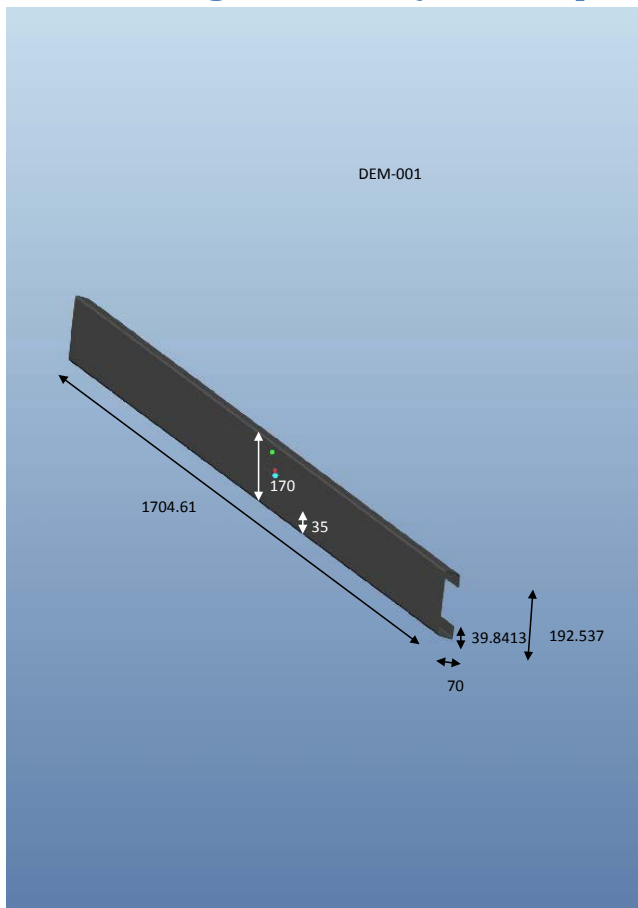
- MINISTERIO DE FOMENTO, *Documento Básico SE (: Seguridad Estructural)* de Código Técnico de la Edificación (CTE), 2009
- MINISTERIO DE FOMENTO, *Documento Básico SE- AE (: Seguridad Estructural Acciones en la edificación)* de Código Técnico de la Edificación (CTE), 2009.
- MINISTERIO DE FOMENTO, *Documento Básico SE- A (: Seguridad Estructural Acero)* de Código Técnico de la Edificación (CTE), 2008.
- ANSYS ONLINE MANUALS (: Release 5.5) [en línea] Disponible en Web: < <http://www.ansys.stuba.sk> >.

## Anexo I: Perfiles utilizados

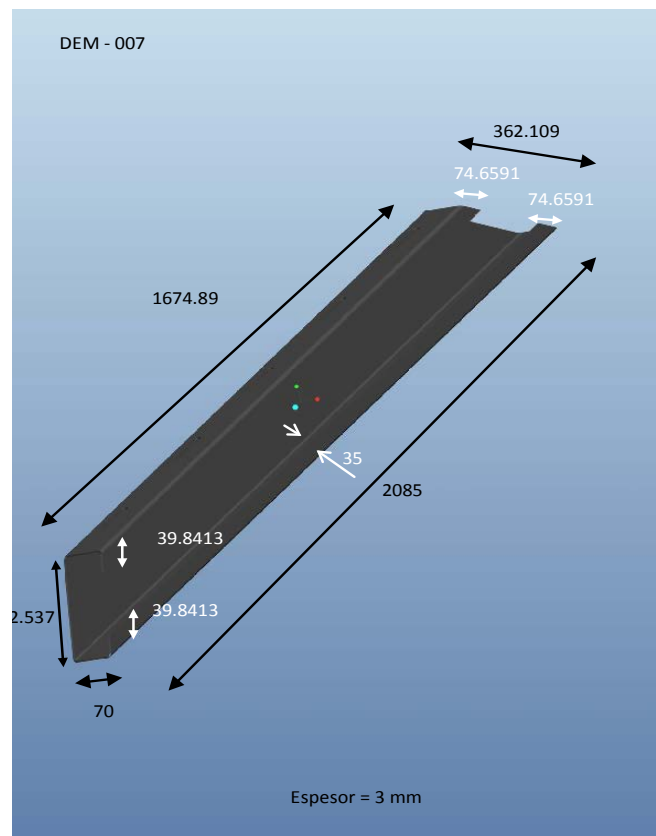
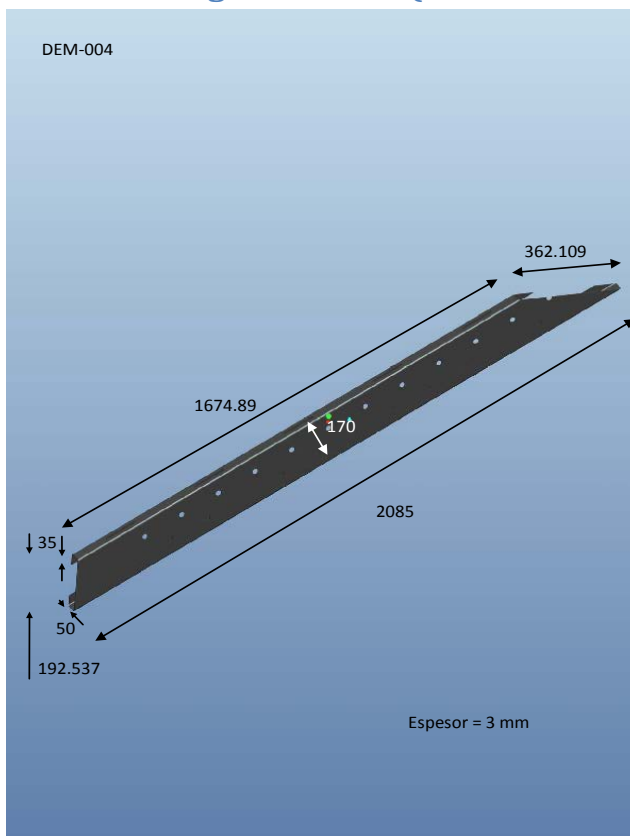
### Perfiles del rellano



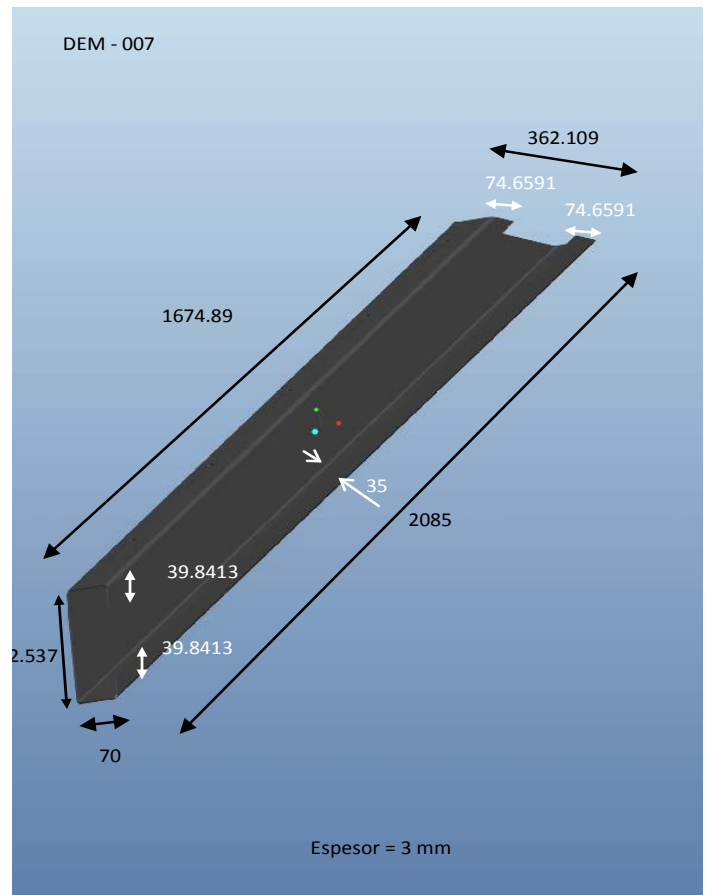
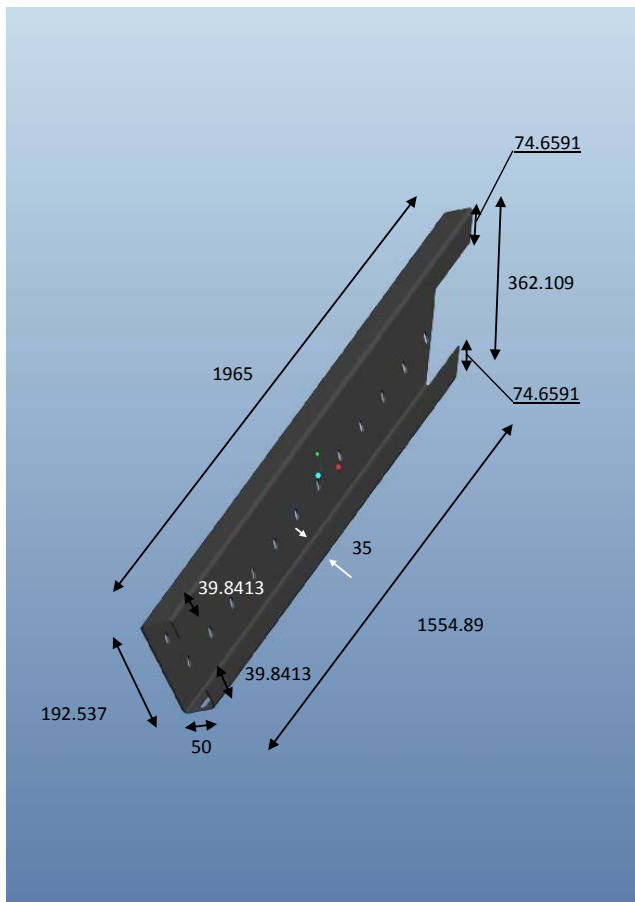
## Perfiles de viga inclinada (Tramo superior)



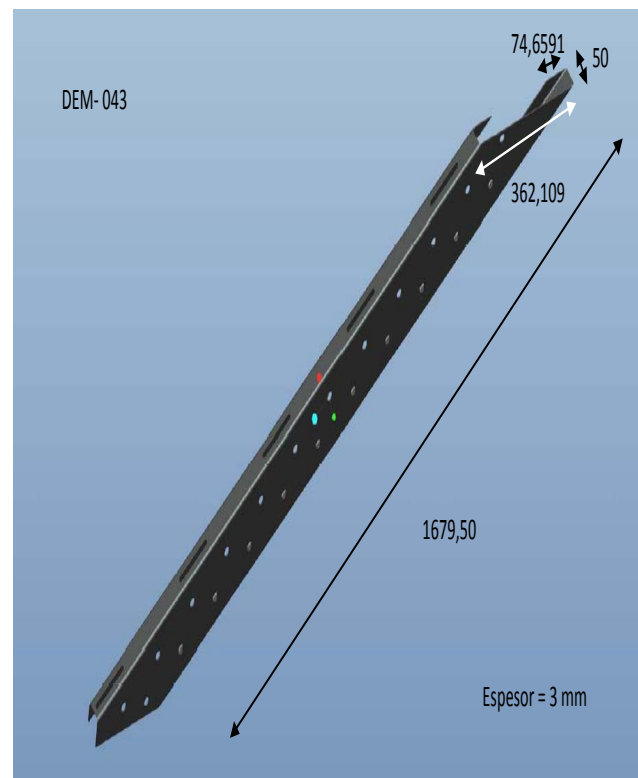
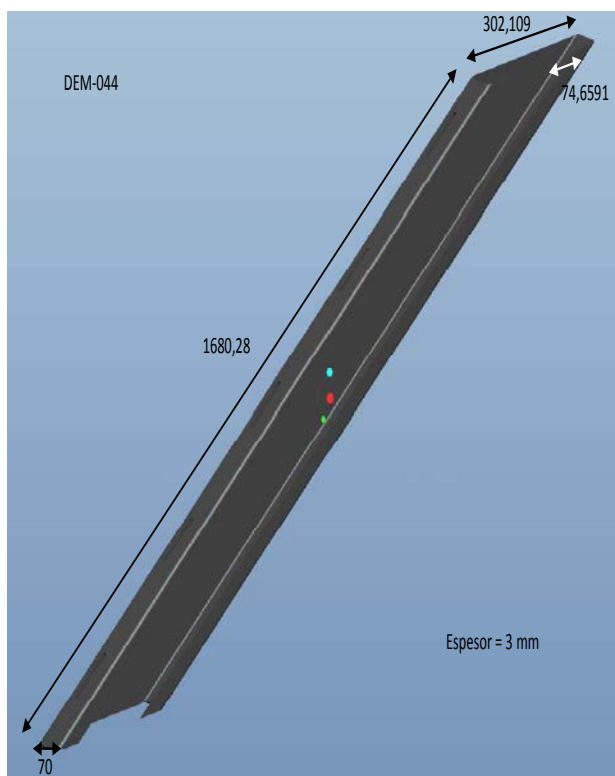
## Perfiles de viga inclinada (Tramo medio)



### Perfiles de viga inclinada (Tramo inferior)



### Perfiles de viga inclinada (Tramo inferior – Piso bajo)



Pilares

